Der Verbrennungsverlauf oberschlesischer Steinkohle auf dem Wanderrost eines Steilrohrkessels mittlerer Größe

Von der Technischen Hochschule Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Rudolf Loewenstein
aus Duisburg

Referent:
Prof. Dr. Ing. H. Baer

Korreferent:
Prof. G. Lotter

Tag der mündlichen Prüfung:
23. Juli 1934.

Kassel-Wilhelmshöhe 1935
Selbstverlag des Verfassers

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545806_0035

Der Verbrennungsverlauf oberschlesischer Steinkohle auf dem Wanderrost eines Steilrohrkessels mittlerer Größe

Von der Technischen Hochschule Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Rudolf Loewenstein
aus Duisburg

Referent:
Prof. Dr. Ing. H. Baer

Korreferent:
Prof. G. Lotter

Tag der mündlichen Prüfung:
23. Juli 1934.

Kassel Wilhelmshöhe 1935
Selbstverlag des Verfassers

*35911

Meinem Vater
und dem Andenken
meiner unvergesslichen Mutter
in Dankbarkeit gewidmet.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Winterhalbjahren 1931/32 und 1932/33 im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule zu Breslau. Es ist mir eine angenehme Pflicht, dem Direktor des Maschinenlaboratoriums, Herrn Professor Dr. Ing. H. Baer, für die wohlwollende Förderung und das freundliche Entgegenkommen meinen herzlichen Dank auszusprechen. Dieses Entgegenkommen beschränkte sich nicht nur auf die Bereitstellung der Mittel des Instituts, sondern führte auch zu einer zeitweiligen Entlastung in meiner pflichtmäßigen Tätigkeit als Assistent, ohne welche es mir nicht möglich gewesen wäre, die zeitraubenden Versuchsschwierigkeiten zu überwinden.

Für die Unterstützung bei den Vorbereitungen und bei der Ausführung der Versuche bin ich in besonderem Maße dem Betriebsingenieur des Maschinenlaboratoriums, Herrn Privatdozent Dr. Ing. H. Faltin und ferner den Meistern des Institutes, Maschinenmeister Schulz, Mechanikermeister Schubert und Oberheizer Gottschlich zu Dank verpflichtet. Bei den Messungen und Ablesungen gewährten mir meine Kollegen am Maschinenlaboratorium und die damaligen Studierenden Sebulke und Fr. Schmidt ihre sehr geschätzte Hilfe.

Die Anregung zur vorliegenden Arbeit erhielt ich schon im Jahre 1929 durch meinen Studienfreund Herrn Dr.Ing. E. Heitmann, Hannover. In den Osterferien 1930 konnte ich mich erstmals mit einigen Vorbereitungen beschäftigen, doch mußte ich danach länger als ein Jahr die Arbeiten unterbrechen.

Herrn Professor G. Lotter bin ich für seine Ratschläge bei der endgültigen Abfassung der Arbeit sehr verbunden.

Kassel-Wilhelmshöhe,
im September 1935.

Rudolf Loewenstein

X. Uebersicht über die Ergebnisse bei verschiedener Schichthöhe und Ermittlung der günstigsten Schichthöhe bei der vorliegenden Feuerung Seite 45

XI. Weitere Messungen und Ergebnisse bei der günstigsten Schichthöhe von 70 mm " 47

1) Temperaturverlauf im Feuerraum " 47

2) Wirkliche und theoretisch erforderliche Luftverteilung " 49

XII. Zusammenfassung " 50

Zahlentafeln und Abbildungen.

L i t e r a t u r .

1) Schulte, Der derzeitige Stand der Feuerungstechnik. Arch. f.W., 10. Jahrgang (1929), S. 97.

Bleibtreu, 13. Berichtfolge des Kohlenstaubausschusses beim Reichskohlenrat.

2) P. Rosin und H.G. Kayser, Zur Physik der Verbrennung fester Brennstoffe. Z.V.D.J. Bd. 75 (1931) Nr. 26.

Kayser: Untersuchungen zur Physik der Rostfeuerungen. Feuerungstechnische Berichte. Heft 9.

3) H.Werkmeister: Verbrennungsverlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrössen. Arch.f.W. 12. Jahrg. (1931) Heft 8 u. Diss. Hannover 1932.

4) W. Deinlein: Temperatur- und Luftmessungen an einem Wanderrost. Z.Bayr.Rev.V. 32. Jahrg. (1928) S. 37.

5) Gramberg: Maschinenuntersuchungen 3.Aufl.(1924)Kap.41 S.131.

6) O.de Lorenzi: Improving boiler room operation. Z.Combustion. Okt.1928,S.192.Mitgeteilt in:Marcard,Beiträge zur Feuerungstechnik von Steinkohlen auf dem Wanderrost. Z. "Die Wärme" (1932) S.397.

7) E. Praetorius: Die Verbrennung von Braunkohle auf dem Arbatzky-Wanderrost. A.f.W. 12.Jahrg. (1931) Heft 7, S. 211, Ausführl.Bericht vergl.Braunkohle Bd.30 (1931)S.241.

8) E.S.Grumell: The mechanism of burning coal on a chain-grate stoker. Mechanical World Bd. 91 (1932) S. 440. Auszug aus einer Veröffentlichung im Ind.Inst. of Fuel, Bd. 5 (1932) S. 361.

9) P.Rosin u.R.Fehling: Die Feuerungsleistung, A.f.W. 11.Jahrg. 1930 Heft 4.

10) Keinath: Elektrische Temperatur-Messgeräte, 1923, Verlag R. Oldenbourg, S. 14.

11) R. Loewenstein: Genaue und schnelle Orsatanalysen. A.f.W. 13. Jahrg. (1932) Heft 10.

12) W. Koch: Praktische Auswertung von Eichkurven für Thermoelemente. Zeitschr. Forschung 1931, S. 302.

13) R. Loewenstein: Freilaufeichung von Flügelrad-Anemometern für kleine Geschwindigkeiten. Z.V.D.J. Bd.77 (1933) Nr.7.

14) Loschge: Versuche zur Verfeuerung minderwertiger,schlackenreicher Feinkohle auf Wanderrosten. Z.V.D.J.1917,S.721.

15) Brabbée: Die zukünftige Kohlenwirtschaft im Hause. Z.V.D.J. 1918 S. 175.

16) W. Pohl: Ueber die Messungen von Rauchgasmengen und ihre Berechnung aus der Brennstoff- und Rauchgasanalyse. Dissert-Aachen 1928.

17) E. Kuhn: Versuche über Temperaturverteilung,Wärmeabgabe und Verbrennungsverlauf in einem neuzeitlichen Kohlenstaubkessel. M.Nr. 133 d.W.-Stelle D-dorf des V.D.Eisenhüttenl.

18) Rosin: Die Durchzündung beim Wanderrost. A.f.W. 13.Jahrg. (1932) S. 113.

19) Ruhrkohlenhandbuch 1. Ausgabe 1929, S. 76.

20) Presser: Die neuere Entwicklung der Wanderrostfeuerung. Arch.f.W. 11. Jahrg. (1930) Heft 4.

21) Fehling: Die Technik der Zuführung von Verbrennungsluft. Arch.f.W. 11. Jahrg. (1930) Heft 4.

22) Richtlinien für die Auswertung der Ergebnisse der Feuerungsuntersuchung. Arch.f.W. 7. Jahrg. (1926) Heft 10, S. 187 - 291.

23) Aufhäuser: Brennstoff und Verbrennung. II. Teil, S. 15, Verlag Springer (1928).

24) Marcard: Zusammenhänge zwischen Feuerraum, Feuerraumtemperatur, Verbrennungsvorgang, Wirkungsgrad. Z."Die Wärme" 1930, H. 39.

25) Barth: Hilfsmittel zur Beurteilung von Brennkammerbauarten. Arch.f.W. 1931, S. 335.

26) Schwackhöfer Fr.: Die Kohlen. 4. Aufl.1928,Verlag Gerold & Co.

27) Gumz, W.: Die Luftvorwärmung bei Rostfeuerungen. Z. Feuerungstechnik (1929) S. 25.

28) Schulte Fr.u. Tanner E.: Stand und Entwicklung der Feuerungstechnik. Z.V.D.J. Bd. 77 (1933) S. 565.

29) Neidhardt H.W.: Gasanalysenfehler und ihre Einflüsse. Arch.f.W. 14. Jahrg. (1933) S. 85 (Heft 4).

30) Schmidt: Mittlg. Kaiser-Wilh.Instit. Eisenforschung Bd. IX (1927). Z.techn.Physik, Bd.7 (1926) Heft 11, A.f. Eisenhüttenw. 1928, Heft 5, S. 293.

31) H. Lent u. K. Thomas: Mittlg.66 der Wärmestelle d.V.D.E.D-dorf.

32) Foxwell: Fuel 3, 122 (1924).

33) P. Schläpfer u. E. Müller: Studien über den Bläh- und Backvorgang bei der thermischen Behandlung von Steinkohlen. Bericht Nr.55 d.Eidgen.Materialprüf.-Anst.Zürich 1931.

34) Tanner E.: Der Temperaturverlauf im Brennstoffbett und im Rost bei der Verbrennung von Steinkohle. Bericht D 60 des Reichskohlenrates, Berlin 1934.

35) Marcard: Beiträge zur Feuerungstechnik von Steinkohlen auf dem Wanderrost. Z. "Die Wärme" 1932 S. 397.

36) Schulze R.: Unverbrennliches in der Kohle und Schlackenbildung. Z. "Die Wärme" 1931 S. 81.
Baum: Z. Glückauf 1928, Nr. 52.

-.-.-.-.-.-.-.-.-

E i n l e i t u n g.

Die Verbrennung von Kohle in Feuerungen ist schon seit längerer Zeit[1] in der Literatur lebhaft behandelt worden; aber erst seit wenigen Jahren hat man den Weg praktischer Versuche beschritten, um in die verwickelten Vorgänge Klarheit zu bringen. Rosin und Kayser[2] sind auf rein physikalischem Wege durch Versuche über Lösungsvorgänge zu neuen Erkenntnissen gekommen; Werkmeister[3] hat zum ersten Mal wirkliche Kohlensorten untersucht und wertvolle praktische Ergebnisse über den Verbrennungsverlauf der verschiedenen Kohlensorten erhalten. Die Anwendung dieser Ergebnisse auf Feuerungen in praktischem Betriebe bedeutet aber einen neuen Schritt, der nicht in allen Fällen ohne weiteres gemacht werden kann. Zwar haben die letztgenannten Versuche den wirklichen Brennstoff zum Gegenstande; sie wurden indessen an einem eigens aufgebauten Versuchsofen mit festem Rost vorgenommen, der in Gestalt, Abmessungen und Betriebsweise nicht mit jeder betriebsmässigen Wanderrostfeuerung einfach zu vergleichen ist, da die Einflüsse der Bauart von Feuerraum und Rost auf den Verbrennungsverlauf unbekannt sind.

Die bislang eingehendste Untersuchung an einem betriebsmässigen Wanderrost, welche von Deinlein[4] ausgeführt wurde, beschränkte sich im wesentlichen auf Temperatur und Luftmessungen. Die Ermittlung des Verbrennungsverlaufes durch gleichzeitiges Absaugen der Brenngase über der Schicht schien praktisch mit zu grossen Schwierigkeiten verknüpft. Zwar sind schon früher Versuche von Gramberg[5] bekannt geworden, bei denen an wenigen Stellen die Zusammensetzung der Gase über der Schicht ermittelt wurde und später wurden im Auslande durch O. de Lorenzi[6] weitere Versuche mit grösserer Zahl der Mess-Stellen wiederholt, doch hat man bis heute an einer wirklichen Wanderrostfeuerung die gleichzeitige Messung der Verbrennungsluft und der Gaszusammensetzung sowie die Ermittlung des Verbrennungsverlaufes hieraus nicht unternommen.

Dagegen ist ein anderer Weg, durch Untersuchung der Brennstoff-Rückstände in verschiedener Entfernung vom Schichtregler Aufschluss über den Verbrennungsverlauf zu gewinnen, an in prak-

tischen Betrieb befindlichen Wanderrosten mit Erfolg beschritten worden. Sowohl für Braunkohle als auch für Steinkohle liegen Untersuchungen vor. So hat Arbatsky[7] an verschiedenen Stellen aus dem Brennstoffbett glühende Braunkohlen-Proben entnommen und unter Luftabschluss sofort abgekühlt; Grumell[8] hingegen entzog gleich das gesamte Brennstoffbett der Feuerung, indem er eine mit dem Wanderrost vorwärts wandernde Rostplatte plötzlich zurückzog und die aufliegende Glutschicht ablöschte, sodass eine Entnahme von Brennstoffproben in grosser Zahl möglich war.

Die Genauigkeit der Untersuchungen namentlich im Hinblick auf die Brennzeit wird durch den unvermeidlichen Zeitverlust zwischen Entnahme und Ablöschen stets mehr oder weniger stark eingeschränkt. Das zweite Verfahren ist aber insofern vorteilhafter, als sich ein klares Bild ergibt über die Veränderung des Brennstoffes hinsichtlich Form und Struktur beim Verbrennungsablauf.

Ermittelt man hingegen die Gaszusammensetzung und die Luftverteilung über die Länge des Rostes und hieraus weiter den Verbrennungsverlauf, so erscheint dieser Weg aufschlussreicher für den praktischen Betrieb der Feuerung. Er gibt überdies hinsichtlich der Brennzeit einwandfreie Ergebnisse. Bei der vorliegenden Untersuchung wurde deshalb dieser bisher noch nicht beschrittene Weg begangen.

I. Die untersuchte Feuerung.

Die untersuchte Wanderrostfeuerung gehört zu einem im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Breslau befindlichen Hochdruck-3Trommel-Steilrohrkessel für 30 atü Dampfdruck (Baujahr 1928). Der Kessel ist nur während der Wintermonate in Betrieb und liefert hier den Frischdampf für eine Entnahme-Kondensationsturbine, welche die Hochschulgebäude sowohl mit Licht- und Kraftstrom als auch mit Heizdampf versorgt. Die Kesselanlage ist durch folgende Werte gekennzeichnet:

Dampfüberdruck: ..... 30 atü
Dampftemperatur: ..... 380 °C
Speisewasser Eintr.Vorwärmer:..55 - 60 °C
" Austr. " 120 - 125 °C
Regeldampfleistung: ..... 4,4 to/h
Höchstleistung: ..... 5,o to/h
Brennstoff: Oberschles. Erbskohle ungewaschen der Hedwigswunsch-und Ludwigsglückgrube.
Körnung 10 - 25 mm (unter 5mm 7%)
Unterer Heizwert: 6800 - 6850 Kcal/kg
Abgastemperatur: ..... 320 °C
Kesselwirkungsgrad: .....etwa 74 %

Heizflächen:

Kesselheizfläche: ..... 125 m^2
Strahlungsheizfläche: Projektion der Rohre gerechnet... 4,9 m^2
" halber Umfang der Rohre gerechnet ..... 7,7 m^2
Verhältnis der Strahlungsheizfläche zur Gesamt-Kesselheizfläche demnach.. 4 - 6 %
Ueberhitzerfläche: ..... 38,5 m^2
Vorwärmerfläche (Stahlguss-Rippenrohr) 144 m^2

Feuerraum:

Mittlere Feuerraumhöhe ..... 3,75 m
Feuerraumbreite oben/unten ..... 1,56/1,26 m
Oberfläche des Feuerraums insgesamt . 40,3 m^2
Kühlziffer des Feuerraums ..... $\frac{4,9}{40,3}$ = 12,5 %
Feuerrauminhalt: ..... 16,63 m^3
Feuerraumbelastung normal ..... 275.000 kcal/m^3h

Rost: Wanderrost mit natürl.Schornsteinzug: (Abb. 1)

Grösste Zugstärke: ..... 20 mm WS

Gesamte Rostfläche R'= lxb = 4,15 x 1,3 = 5,4 m^2

Feuerbedeckte Rostfläche R = 4,15 x 1,26= 5,24 m^2

Freie Rostfläche Rf =..... = 1,325 m^2

$100 \cdot \frac{Rf}{R}$ = ... 25,3 %

Luftspaltweite: 4 mm, ausserdem 2 mm tiefe Rillen in den an der Brennbahn 15 mm starken Rosten.

Verhältnis Rostfläche : Heizfläche = 5,4 : 125 = 1 : 23

Grenzen der Schichtregelung: ..... 0 - 30 cm

Zur Veränderung der Rostgeschwindigkeiten sind 8 verschiedene Getriebestellungen vorgesehen:

Rostgeschwindigkeiten

bei Gang	1	V_1 =	4,8	m/h	bei Gang	5	V_5 =	10,85	m/h
" "	2	V_2 =	5,85	"	" "	6	V_6 =	13,1	"
" "	3	V_3 =	6,8	"	" "	7	V_7 =	15,25	"
" "	4	V_4 =	8,4	"	" "	8	V_8 =	19,85	"

Luftregulierung:

Unter dem letzten Teil des Rostes befindet sich ein Schieberost zur Luftregulierung, um den Luftdurchtritt durch die abgebrannte Schicht zu drosseln.(Abb.2). Die Länge des Luftschiebers beträgt 900 mm. Es sind 5 Einstellmöglichkeiten vorhanden: Stellung 0 - Stellung 4. Bei Stellung 4 (volle Öffnung des Schieberrostes) sind etwa 40 % der vollen Fläche für den Luftdurchtritt frei.

Bei geschlossenem Luftrost (Stellung 0) beträgt die freie Durchtrittsfläche immerhin noch knapp 10 %.

Belastungsgrenzen:

Höchste Dampfbelastung der Kesselheizfläche .. 40 kg/m^2h

Dampfbelastung bei Regellast ..... 35 kg/m^2h

Höchste Rostbelastung des Wanderrostes 130 kg/m^2h

Rostbelastung bei Regellast ..... 115 kg/m^2h

Bei gutem Zuge kann die Rostbelastung einige Zeit lang auf 140 kg/m^2h gesteigert werden. Die dieser Rostbelastung entsprechende erhöhte Belastung der Kesselheizfläche kann durch verstärkte Speisung ausgeglichen werden, ohne dass mehr Dampf erzeugt zu werden braucht, als der Höchstlast von 5 to/h entspricht.

II. Allgemeine Versuchserläuterung.

Eine wesentliche Aufgabe zur Ermittlung des Verbrennungsablaufs bestand also darin, die Rauchgaszusammensetzung in verschiedener Entfernung vom Kohleneinstellschieber festzustellen und gleichzeitig die an diesen Stellen durch die Brennstoffschicht tretende Luftmenge zu messen. Dabei wurde Wert darauf gelegt, die wahre Gaszusammensetzung unverfälscht durch Nachverbrennung zu erhalten. Es kam deshalb für die Gasentnahme nur ein wassergekühltes Entnahmerohr in Betracht. Bei den Untersuchungen von Deinlein[4)] hatten sich - nach Überwindung anfänglicher Schwierigkeiten - Anemometer zur Messung der Luftgeschwindigkeit am Wanderrost als gut brauchbar erwiesen, sodass die gleichen Instrumente sich auch hier empfahlen. Um ferner über die Durchzündung der Schicht ein Bild zu gewinnen, sollte der Temperaturverlauf an der Oberkante des Rostgliedes gemessen werden, wobei gleichzeitig Aufschluss über die Beanspruchung der Rostglieder bei verschiedenen Schichthöhen erhofft wurde. Wenn es gelang, die wahre Rauchgaszusammensetzung zu ermitteln, so erschien es weiterhin auch sehr wertvoll, gleichzeitig die wahre Gastemperatur festzustellen. Hierfür kam nur ein Absaugepyrometer in Frage, welches die durch Strahlungseinflüsse eintretenden Fehler in der Temperaturmessung auszugleichen gestattete.

Es wurde von vorne herein besonderer Wert darauf gelegt, die Messinstrumente so zu entwickeln, dass möglichst wenig Änderungen an der Wanderrostfeuerung vorgenommen zu werden brauchten, damit für etwaige spätere Messungen an Wanderrosten anderer Bauart die Instrumente wieder Verwendung finden konnten, um so die zeitraubende Arbeit der Entwickelung der Versuchseinrichtung für die Zukunft zu ersparen. Da der untersuchte Kessel den Dampfbedarf des Laboratoriums und der Hochschule dekken musste, so lag auch ein gewisser Zwang nach der gekennzeichneten Richtung vor, damit der normale Betrieb nicht allzusehr gestört wurde. Dadurch ergab sich aber für die vorliegende Arbeit eine besondere Erschwernis und die Entwicklung der Versuchseinrichtung wurde mehr und mehr zum ersten Teil der Arbeit selbst.

III. Entwicklung der Versuchseinrichtung.

a) Gasabsaugerohr:

Um Messfehler möglichst auszuschalten, sollten die Feuergase an nicht zu wenig Stellen über der Brennstoffschicht abgesaugt werden. Bei den bisher in der Literatur bekannt gewordenen Versuchen[5 u.6)] wurde das Gasabsaugerohr stets durch eine Öffnung im Mauerwerk in den Ofen eingeführt. Bei diesem Vorgehen ist man aber an die gleiche Öffnung gebunden, kann also die Höhenlage der Absaugung nicht ändern, was bei Versuchen mit verschiedener Schichthöhe erstrebenswert erscheint. Das Anbringen einer grösseren Anzahl von Öffnungen im Mauerwerk lässt sich ferner nur bei einer reinen Versuchsfeuerung ausführen. Es wurde deshalb ein langes Gasentnahmerchr entworfen, welches auf dem Roste aufliegend von vorne unter dem Brennstoffschieber hindurch in die Feuerung eingeschoben werden konnte. Um über der Brennstoffschicht absaugen zu können, war das Ende des Rohres rechtwinklich zur Einschieberichtung ausgeführt, sodass ein Hakenrohr entstand.

Abb. 3 zeigt dieses 5,50 m lange, wassergekühlte Hakenrohr, dessen Ende ausserdem bügelförmig gestaltet ist, damit die Brennstoffschicht nicht unnötig aufgerissen wird. Obwohl drei Rohre ineinander geschachtelt sind, bereitete die Herstellung keine Schwierigkeiten, da beim Löten und Schweissen der Ecken sich die inneren Rohre durch Wasser kühlen liessen. Beim Einschieben in die Feuerung lag das Rohr einerseits in der linken Ecke auf dem Wanderrost, andererseits auf einem fahrbaren Holzbock, wo es mittels Rohrschelle befestigt war.(Abb. 4) Da nach den ersten Versuchen doch noch ein geringes Aufreissen des Feuerbettes in der linken Ecke einen ungleichmässigen Abbrand zur Folge hatte, wurde das Rohr über die Brennstoffschicht verlegt. Unmittelbar hinter dem Brennstoffschieber, der zum Zwekke der Rohreinführung nun in der linken Ecke ausgeschnitten werden musste, liess sich als Auflager ein fester Eisenklotz befestigen, der im Verlauf von zwei Jahren mit je 8monatigem Kesselbetrieb nur oberflächlich anschmorte. Soweit das Rohr in den Feuerraum eingeschoben war, hing es freitragend über. Erst bei sehr weitem Hereinschieben kam die überhängende Ecke durch geringes Ankippen des Bockes zur Auflage auf den Rost.

Hierdurch wurden keine Schwierigkeiten verursacht; das Rohr liess sich in jedem Falle ohne Anstrengung herein- und herausschieben (Abb. 5). Für Untersuchungen an Rosten genügender Breite dürfte es indessen durchaus ausreichend sein, wenn man das Hakenrohr einfach auf dem Rost aufliegen lässt.

Die Erwärmung des Kühlwassers war bei der Lage des Rohres a.d.Rost sehr gering. Nach dem Höherlegen des Rohres über die Brennstoffschicht betrug die maximale Abflusstemperatur ca. 50 °C. bei 14 °C. Zuflusstemperatur (Durchfluss = 45 lit/min.). Bei 75 °C. Abflusstemperatur, die durch Kühlung mit warmen Wasser erreicht wurden, bildeten sich schon Dampfblasen; es findet also eine starke Rückkühlung durch das einfliessende Wasser statt. Bei Warmwasserkühlung, die aus später erörterten Gründen vorübergehend angewandt wurde, ist deshalb das Arbeiten mit dem Rohr nicht ungefährlich.

Die grössten Schwierigkeiten traten durch das Verstopfen des Absaugerohres ein. Um Nachverbrennungen zu vermeiden, wurde zunächst für das erste 80 cm lange Stück ein Kupferrohr von 3 mm lichter Weite gewählt, ein für das Erreichen des genannten Zweckes schon fast zu reichlicher Durchmesser. Trotzdem verstopfte sich das Rohr schon sehr bald; hauptsächlich wurde Russ als Ursache erkannt, der zusammen mit dem bei Unterschreitung des Taupunktes der Rauchgase sich bildenden Wasser die Leitung verklebte. Die oben erwähnte Warmwasserkühlung konnte den Übelstand nicht ausreichend beseitigen, da durch geringe Teerspuren ein Zusammenbacken von Russ ebenfalls noch genügend Störung verursachte. Da konstruktive Änderungen (Erweiterung der Leitung an bestimmter Stelle) ebenfalls keinen nachhaltigen Erfolg brachten, wurde ein Versuch mit Filtern gemacht. Abb. 6 zeigt die konstruktive Ausführung, bei der keramische Filter der Mono G.m.b.H. verwendet wurden, die zum Schutz gegen Verschlackung nicht unmittelbar den Feuergasen ausgesetzt werden durften. Es gelang auf diese Weise, einen stundenlangen Betrieb mit fortlaufender Analyse durch einen Mono-Apparat aufrecht zu erhalten. Es ist aber anzunehmen, dass im Filter selber Nachverbrennungen vor sich gehen können. Nachdem also lange, sehr zeitraubende Versuche keinen eindeutigen Erfolg gebracht hatten, musste man sich entschließen, Nachverbrennungen in Kauf zu nehmen.

Da auch Temperaturmessungen der Rauchgase beabsichtigt waren, so bedeutete die Unvermeidlichkeit von Nachverbrennungen eine Schmälerung der Ergebnisse, die sich sonst aus den Temperaturmessungen hätten ziehen lassen. Das Ziel der Ermittlung des Verbrennungsablaufes konnte aber aufrecht erhalten werden, da es für den zeitlichen Verlauf der Umwandlung des Kohlenstoffs nicht so wesentlich ist, ob dieser umgewandelte Kohlenstoff in der Kohlensäure oder im Kohlenoxyd festgestellt wird. In den Hauptversuchen wurde deshalb der Einfachheit halber ein Rohr hergestellt mit innenliegendem Kupferrohr von gleichmässiger 10 mm lichter Weite. Bei zu langem Absaugen an bestimmten Stellen konnte selbst dieses Rohr sich noch verstopfen. Die Abb. 7, welche gefüllte Gassammelflaschen darstellt, zeigt recht deutlich, welche erheblichen Russmengen an bestimmten Stellen in der Feuerung auftreten.

b) Anschlussleitungen:

Eine zweite Hauptschwierigkeit lag in der Herstellung einer Leitungsverbindung zum Anschluss der mit dem Rost wandernden Thermoelemente und der zur Luftmessung dienenden Anemometer an die Anzeigegeräte. Die Verwendung einer Steckdose wurde mit Rücksicht auf Oxydieren der Klemmen und unsicheren Kontakt vermieden und statt dessen ein Klemmbrett angewendet. Da selbst bei Verwendung einer Steckdose ein Herausziehen des Anschlusskabels am Rostende sich wegen der Unzugänglichkeit der Bauart nicht machen liess, so musste man das einmal angeschlossene Kabel mit dem Roste herumlaufen lassen, um es bei seiner Ankunft vorne unter dem Rost hindurchzuziehen. Um am hinteren Rostende Einklemmungen zu vermeiden, wurde dort eine einfache Vorrichtung aus Winkeleisen angebracht. Die Leitungsdrähte, sehr haltbare asbestisolierte Litzen von Hartmann & Braun, wurden noch zum Schutze in einen biegsamen Stahlschlauch eingezogen. Nachdem verschiedenen Kleinigkeiten sorgfältige Beachtung geschenkt worden war, liess sich in der besprochenen Weise sehr gut arbeiten. Die Kabel waren äusserst haltbar. Als besondere Vorteile seien noch erwähnt:

1). die Möglichkeit, bis zu 6 Leitungen in einem Kabelschlauch unterzubringen,

2). rasches, fortlaufendes Arbeiten ohne Zeitverlust beim

Anklemmen. Während der Rost weiterlief, konnte das hintere Kabelende in Ruhe an die Kupferleitungen zu den Instrumenten angeklemmt werden. Abb. 5 zeigt im Lichtbild das Klemmbrettchen mit angeschlossenem Kabel und der Entlastung der Klemmen mittels Bindedraht-Zuges. Beim Hineinwandern legt sich das Kabel auf die vorstehenden Bolzen der endlosen Kette auf.

c). Anemometer:

Zur Luftgeschwindigkeitsmessung dienten zwei Flügelrad-Anemometer von 110 mm Schutzringdurchmesser mit elektrischer Kontaktgabe nach ca. 10 m Windweg (Firma Rosenmüller,Dresden). Die Instrumente wurden bei den ersten Versuchen infolge hoher Temperaturen stark beschädigt. Die feinen Zahnrädchen der Kontaktgabe kamen durch Verwerfen der Lagerplatten ausser Eingriff und wurden teilweise zerstört. Die geölten feinen Zapfenlager, (ca. 0,4 mm ⌀) verkrusteten. Die Messung der Lufttemperatur mittels eines einfach strahlungsgeschützten Thermoelementes ergab hinten unter dem Wanderrost Werte bis zu 300 °C. Um die empfindlichen Teile des Instrumentes gegen Strahlung zu schützen, wurde das Triebwerksgehäuse doppelwandig ausgeführt und ferner Aluminiumfolie mittels Wasserglas aufgebracht. Zerstörungen traten nun nicht mehr auf. Der Radstern des Flügelrades wurde aus Stahl hergestellt, um mechanische Verbiegungen auszuschliessen. Die Aluminiumflügel waren temperaturbeständig. Dagegen verzunderten nach einiger Zeit selbst in doppeltgeschütztem Triebwerksgehäuse die Kontaktfedern aus Bronze und verloren ihre Federkraft. Sie wurden ersetzt und später oberflächenvergoldet. Die Kontaktgabe selber erfolgte wirksam durch Platinkontakte, die gegen Verschmoren durch Parallelschaltung eines Kondensators von 0,5 µF mit vorgeschaltetem Widerstand gesichert wurden. Um Störungen der Anemometer durch Rostdurchfallstücke zu vermeiden, wurden dachförmige Siebe von 3 mm Maschenweite über den Instrumenten angeordnet. Der Einbau der letzteren erfolgte kurz vor den Messungen durch eine Öffnung im Rostträger, welcher mit einem Schlitz versehen war, sodass die mittels Flügelschraube festzuklemmenden Instrumente bequem an die über die Rostbreite verteilten Messtellen (I - VI) verschoben werden konten. (Abb. 5). Auf dem Rost-Rückwege liess es sich nicht vermeiden, dass Rostdurchfallstücke auf die Flügelräder auftrafen.

Eine anfänglich eingebaute Klappenvorrichtung, die an der hinteren Rostumkehrstelle durch Eigengewicht herunterklappen und die Messgeräte abdecken sollte, war nicht betriebssicher und wurde deshalb verlassen. Die am meisten durch fallende Teile gefährdeten Flügelspitzen liessen sich dagegen in einfacher Weise durch einen am Anemometer-Schutzring angebrachten Einlaufring schützen, der den Spalt ganz und die Flügelspitzen um 1 - 2 mm überdeckte. Nach diesen grösstenteils erwähnten Umänderungen waren die empfindlichen Instrumente Dauermessungen gewachsen. Erwähnt sei noch, dass die bewegten Teile völlig trocken in den Lagern laufen mussten.

Besondere Aufmerksamkeit und dauernde Nachkontrolle erforderte noch die Isolierung der Klemmen und Zuleitungen. Die Registrierung der Anemometer-Messungen erfolgte auf einer uhrwerksangetriebenen Schreibtrommel mit halbstündiger Umlaufzeit. Auf der gleichen Trommel wurde auch der Ort des Anemometers durch von der vorderen Wanderrostwelle betätigte Kontakte vermerkt.

d). Zugmessung.

Zur Zugmessung dienten zwei Mikro-Manometer, die wahlweise je auf die 4 Messtellen über dem Rost bezw. 2 Messtellen unter dem Rost umgeschaltet wurden.

c). Temperaturmessung.

Die erwähnten Temperaturmessungen unter dem Rost liessen die Vermutung aufkommen, dass auch die Verbrennungsluft selber sich schon merklich erwärmt, ehe sie durch das obere Rostband hindurchtritt. Es galt hier, das Thermoelement gegen Strahlung möglichst weitgehend zu schützen; andererseits den Berührungswärmeübergang zwischen Luft und Lötstelle zu vergrössern. Das zu diesem Zweck angefertigte Instrument zeigt Abb. 8 im Einbau unter dem Rost. Der dreifache zylindrische Strahlungsschutz wurde noch durch die bewährte, mit Wasserglas aufgebrachte Aluminiumfolie verstärkt; desgleichen die Abschlussflächen oben, die aus Strömungsrücksichten zum Teil kegelförmig ausgebildet wurden. Zur Abschirmung gegen etwaige Strahlung von unten war eine an der Aussenfläche ebenfalls mit Aluminiumfolie belegte Blechspirale eingebaut, welche die Luftströmung unmittelbar auf die Löt-

stelle lenkte, derart dass letztere hierdurch an der engsten Stelle des Strömungsquerschnittes und damit an der Stelle höchster Geschwindigkeit sich befand. Die Wirksamkeit der Blechspirale gegen Strahlung wurde mit elektrischer Heizsonne bei eingebauter und nicht eingebauter Spirale nachgewiesen.

Um die Durchzündung der Kohleschicht feststellen zu können, sollte auch die Temperatur im Rostglied gemessen werden. Der Einbau des Thermoelementes ins Rostglied ohne Beeinträchtigung des von der Oberkante erfolgenden Wärmeflusses ist schwierig.(Abb.9). Es wurde in das Rostglied von der Oberkante her ein 4 mm breiter Schlitz eingefräst. Da 30 mm von der Oberkante entfernt der Rost mit einer Querbohrung von 25 mm Ø versehen worden war, liess sich der Schlitz durch Bohrungen von 4 mm Ø mit der Querbohrung verbinden. Die mit Porz Lanröhrchen geschützten 1 mm starken Ni-Ni-Cr-Drähte kamen im Schlitz zunächst längs der Rostoberkante zu liegen und ihre Enden wurden durch die 4 mm Bohrungen in die Querbohrung isoliert hinausgeführt. Der Schlitz wurde mit Schamotte und Wasserglas ausgefüllt und oben mit einem 5 mm starken Eisenstab durch Schweissen verschlossen. Die Thermoelemente-Lötstelle befand sich ungefähr 8 - 9 mm unter der Oberkante und 2 - 3 mm vom undurchbrochenen Roststabmaterial entfernt.

Für die Temperaturmessungen mit den Ni-NiCr-Elementen fand ein Türmchen-Instrument von 18 m V Skalenbereich Verwendung, dessen Messbereich sich bei höheren Temperaturen durch vorgeschalteten Präzisionswiderstand erweitern liess. Der hohe Instrumentenwiderstand von 1500 Ω machte eine Kompensations-Schaltung überflüssig, da der Gesamtwiderstand der Leitungen nur wenige Ohm betrug. Die Elemente waren auf eine Kaltlötstelle von 20 °C geeicht. Da die Kesselhaustemperatur nur wenige Grade höher war, so erschien eine künstliche Kaltlötstelle entbehrlich. Die Differenz zwischen Kesselhaustemperatur und Eichtemperatur kann in diesem Falle unbedenklich zum Messergebnis addiert werden.[10)]

f. Gasanalysen-Apparate.

Es erwies sich als notwendig für die Versuche, rasch und sicher arbeitende Gasanalysen-Apparate nach Orsat zu besitzen, da registrierende Apparate sich für die Hauptversuche als nicht

brauchbar erwiesen, weil sie zu langsam und auch ungenauer arbeiten. Dementsprechend wurden die vorhandenen Orsat-Apparate verbessert, worüber bereits an a.O. berichtet wurde.[11] Die Absorptionsmittel der einzelnen Gasbestandteile sind aus folgender Aufstellung ersichtlich:

Gasart	Absorptionsmittel bezw. Bestimmungsmethode.
CO_2	Kalilauge (1 : 2,5)
CnHm	gesättigtes Bromwasser
O_2	Pyrogallussäure
CO	Jodpentoxyd in 10% SO_3 haltiger H_2SO_4
H_2	Verbrennung über CuO; Kontraktion
CH_4	Verbrennung über CuO. Absorption des entst. CO_2 in Kalilauge.

Die Feuerherdgase wurden in Gassammelflaschen mit 2 eingeschliffenen Glashähnen, darunter ein Schwanzhahn, abgefüllt und im Laboratorium in vorstehender Weise untersucht. Die Hahnbohrungen betrugen meist 2 mm Ø; wegen des später erörterten raschen Absaugens wäre eine noch grössere Hahnbohrung vorteilhaft. Sämtliche Hähne wurden vor jedem Versuch neu eingefettet und mittels Strahlpumpe auf ihre Dichtigkeit geprüft.

Als Sperrflüssigkeit diente 25%ige Kochsalzlösung, die mit Motorenabgas gesättigt war.

g). Betriebsinstrumente.

Die am Kessel befindlichen Betriebsinstrumente wurden zum Teil ebenfalls zu den Messungen mitbenutzt, nachdem sie auf ihre Anzeige hin geprüft worden waren. Mit der Untersuchung der Feuerung selbst stehen die Angaben der Betriebsinstrumente nur in mittelbarem Zusammenhang (Kesselbelastung, Kesseldruck, Abgastemperatur, Zugmessung am Kesselende.).

h). Gas-Pyrometer.

Zur Messung der Rauchgastemperatur wurde ein Absaugepyrometer mit elektrischer Heizung hergestellt, das im wesentlichen dem von Schmidt[30] entworfenen und beschriebenen Pyrometer entsprach, wie die Abb. 10 zeigt. Von der Mitte eines Heizröhrchens aus Platin, welches durch elektrischen Strom (20 Amp.) geheizt werden kann, sind die Thermoelementdrähte aus Platin-

Platin Rhodium isoliert nach aussen geführt. Das Heizröhrchen, welches von einer kräftigen Nickelkappe umgeben ist, wird unmittelbar den Feuergasen ausgesetzt. Dabei nimmt die in der Mitte befindliche Thermo-Lötstelle infolge der Abstrahlung an die indirekt gekühlte Nickelkappe stets eine tiefere als die wahre Gastemperatur an. Durch elektrische Heizung kann nun die Temperatur der Lötstelle auf die wahre Gastemperatur und darüber aufgeheizt werden. Da sich mittels Strahlpumpe ein kräftiger Gasstrom an dem Heizröhrchen vorbeisaugen lässt, so zeigt das Mess-Instrument eine plötzliche Aenderung des Ausschlages infolge des vergrösserten Wärmeüberganges an, dessen Richtung verschieden ist, wenn die wahre Gastemperatur höher oder tiefer liegt als die bei abgestellter Absaugung abgelesene Temperatur der Lötstelle. Erfolgt durch das Absaugen keine Änderung des Ausschlages mehr, so hat man die wahre Gastemperatur erreicht.

Das Instrument wurde in der Werkstatt des Maschinenlaboratoriums mit Material der Firma Heräus, Hanau, hergestellt, die auch in dankenswerter Weise zur Herstellung ihren Rat lieh. In der äusseren Form wurde das Absaugepyrometer ebenfalls als 5,50m langes Hakenrohr ausgebildet, da es in gleicher Weise wie das Gasabsaugerohr von vorne eingeschoben werden sollte. Ein wassergekühlter Mantel, in welchem flach gedrückte Kupferrohre den Hinstrom des Kühlwassers übernehmen, gibt dem Instrument seine äußere Form und seinen Halt. Die Schweissung des Kühlmantels an der Ecke des Hakens brachte Schwierigkeiten mit sich. Diese wurden gelöst, indem zunächst die Ecke selbst aus kurzen Rohrstücken grösseren Durchmessers geschweisst wurde, wobei die innen liegenden nur gelöteten Leitungen durch asbestverkleidete Bleche vor der Schweisshitze geschützt wurden.

Nach Fertigstellung des Gaspyrometers erwies sich die Kühlung als nicht ausreichend; der Kühlmantel wurde daraufhin wesentlich vergrössert. Ferner ergaben sich durch die Form des Pyrometers bedingte weitere Änderungen gegenüber der Ausführung von Heräus. Insbesondere musste das Heizröhrchen nach den ersten Versuchen in seiner Lage zur Absaugeöffnung besonders festgelegt werden, da durch die Temperatur unvermutete Verschiebungen auftraten, welche die beabsichtigte Wirkung der Absaugung sehr verringerten.

Durch diese Änderungen verzögerte sich die Fertigstellung, sodass das Pyrometer zu den Hauptversuchen im Frühjahr 1932 nicht mehr benutzt werden konnte. Infolge der Unvermeidbarkeit von Nachverbrennungen ist ja auch an sich die gemeinsame Auswertung von Rauchgasanalyse und Rauchgastemperatur-Messung beschränkt, sodass die nachträgliche Ausführung der Temperatur-Messung nicht so in's Gewicht fällt. Bei dieser Sachlage wurden die Temperatur - Messungen auch nur für eine Schichthöhe durchgeführt. Hier geben die Messungen aber einen guten Ueberblick über die grundsätzliche Verteilung der Temperatur.

IV. E i c h u n g e n:

a) Thermoelemente:

Die Thermoelemente waren von Heräus geeicht. Die Eichkurven wurden jedoch an einigen Stellen (Siedepunkt des Wassers, Schmelzpunkt von Antimon, 630 °C, Schmelzpunkt von Kupfer,1083 °C nachgeprüft. Gelegentlich wurde auch aus den Kompensationsleitungen für Ni-NiCr ein Thermoelement hergestellt, das eine etwas abweichende Thermokraft ergab, Abb.11. Die Abbildung 12 gibt die Eichkurve für Platin-Platin-Rhodium in gebrochener Form nach der in der Zeitschrift " Forschung " mitgeteilten Methode[12)] auch für wenige Eichpunkte mit hoher Genauigkeit.

Beim Absaugepyrometer war der Widerstand der 0,5 mm starken Platin-Platin-Rhodium-Drähte von 6,00 m Länge gegenüber dem Instrumentenwiderstand von 408 Ω nicht zu vernachlässigen. Da aber eine Messung mittels Kompensationsverfahren während der Versuche wegen der schon notwendigen Heizungs-Kompensation nicht ausführbar war, wurde das Instrument vorher mittels Kompensations-Schaltung nach Lindeck-Rothe geeicht, indem die wahre Thermospannung und die bei direkter Schaltung an das Millivoltmeter erhaltene Spannung bei verschieden starker elektrischer Heizung ermittelt wurde. Abb. 13. Temperaturunterschiede der Platindrähte gegenüber den Verhältnissen während der Versuche sind nur in geringem Maße möglich, sodass diese Eichmethode zulässig ist.

c). Anemometer.

Die Anemometer wurden von der Lieferfirma im Freilauf und Zwanglauf geeicht. Nach beendigtem Versuche wurde nach einem

besonderen Verfahren, worüber anderwärts berichtet wurde[13)], eine Nacheichung im Freilauf vorgenommen, welche erhebliche Abweichungen ergab. Die Ergabnisse der eigenen Eichung wurden der Auswertung zugrunde gelegt. Abb. 14 und 15. Eine ebenfalls ausgeführte Freilaufeichung eines Anemometers mit darüber befindlichem dachformigen Sieb ergab um 5% unempfindlichere Werte. Trotzdem brauchte dieser Einfluss nicht berücksichtigt zu werden, da beim Einbau unter dem Rost der Widerstand des Rostes gegenüber dem Sieb völlig überwiegt , sodass hier die Luft keine Veranlassung hat, dem Sieb auszuweichen.

Da erhebliche Lufttemperaturen unter dem Rost festgestellt wurden, musste der Einfluss der Lufttemperatur auf die Anemometeranzeige ermittelt werden. Versuchsmässig lässt sich dies nur im Zwanglauf und nicht ohne umständliche Versuchs_Einrichtung machen. Deshalb wurde, wie im nächsten Abschnitt ausgeführt wird, auf theoretischem Wege die Lösung versucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung stellt die Abb. 16 dar, aus welcher sich die Berichtigung abhängig von der Luftgeschwindigkeit und der Lufttemperatur ermitteln lässt.

> Anm.: Allerdings lässt sich auf theoretischem Wege der Einfluss veränderter Reibungsverhältnisse infolge verschiedener Längendehnung der einzelnen Teile des Anemometers nicht untersuchen. Nach Beendigung der Auswertung wurden Ergebnisse von Brabbée 15) bekannt, welche die Eichwerte eines Anemometers zwischen 20 und 70 °C enthalten. Dieselben ergeben mit steigender Temperatur eine anfangs sehr starke Änderung, die aber mit wachsender Temperatur rasch zurückgeht und bei 70 °C schon zu konstanten Reibungsverhältnissen führt. Da die zur vorliegenden Arbeit benutzten Anemometer jedoch einmal mit reichlichem Spiel in den Lagern liefen (0,5 mm in Achsenrichtung) und zweitens völlig trockene Reibung vorhanden war, so ist eine erhebliche Änderung der Reibung hier nicht anzunehmen. Eine dem wirklichen Einbau gerecht werdende Eichung würde auch deshalb noch Schwierigkeiten bereiten, weil der Einfluss der Strahlung, denen die einzelnen Anemometerteile in verschiedener Weise ausgesetzt sind, nicht abgeschätzt werden kann.

V. Einfluss der Lufttemperatur auf Anemometer-Anzeige:

Die Änderung der Lufttemperatur hat eine Änderung des spezifischen Gewichtes der Luft im umgekehrten Verhältnis der absoluten Temperaturen zur Folge. Es muss also der Einfluss des spezifischen Gewichtes auf die Drehzahl des Anemometers unter-

sucht werden.

Wenn in der Sekunde G kg/sec Luft mit der Geschwindigkeit c m/sec durch die Kreisringfläche (Projektion der Fügelfläche) hindurchströmen, so ist die in der Luft zur Verfügung stehende Leistung:

(1) $$L_o = G \cdot \frac{c^2}{2g} \text{ mkg/sec}$$

Das Durchfluss-Gewicht G ist aber ebenfalls von der Geschwindigkeit c abhängig.

(2) $$G = f \cdot c \cdot \gamma \text{ kg/sec} \quad \text{worin } f = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2)$$

die Kreisringfläche in m^2 und γ das spezifische Gewicht in kg/m^3 bedeutet.

Demnach ist die zur Verfügung stehende Leistung in 3.Potenz von der Geschwindigkeit abhängig.

(3) $$L_o = k' \cdot \gamma \cdot c^3 = k \cdot c^3 \text{ mit } k = \frac{f \cdot \gamma}{2g}$$

Zahlenwerte:

$\gamma = 1{,}205 \text{ kg/m}^3$ bei Luft von 20°C und 760 m/m Hg; $g = 9{,}81 \text{ m/sec}^2$; $d_1 = 10$ cm und $d_2 = 3{,}6$ cm, also $f = 78{,}33 - 10{,}17 = 68{,}36 \text{ cm}^2$

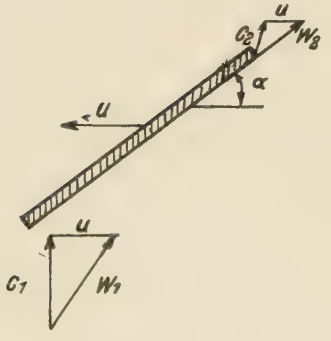
$f = \frac{68{,}36}{10^4} \text{ m}^2$. Es ergibt sich:

$$k = \frac{68{,}36}{10^4} \cdot \frac{1{,}205}{2{,}981} = 4{,}2 \cdot 10^4 \text{ kg sec}^2/\text{m}^2$$

Von der in der Luft zur Verfügung stehenden Energie L_o wird nur ein Teil entsprechend dem Umfangswirkungsgrad η_u an das Flügelrad übertragen.

(4) $$L_u = L_o \cdot \eta_u \text{ mkg/sec}$$

Bestimmung des Umfangswirkungsgrades η_u



Betrachtet seien zunächst die Verhältnisse bei verlustloser Strömung. Nebenstehende Abbildung stellt einen Schnitt durch eine Flügelfläche mit dem Anstellwinkel α dar, die sich mit der Umfangsgeschwindigkeit u gleichförmig bewege. Die Zerlegung der Absolutgeschwindigkeiten c_1 und c_2 in die Relativ-Geschwindigkeiten w_1 und w_2 erfolgt in bekannter Weise. Die Umfangsleistung von 1 kg Luft ergibt sich zu $L_{1u} = \frac{u}{g}(c_1' - c_2')$ mit c_1' und c_2' als Umfangskomponente

$c_2' = w_2 \cos\alpha - u = w_1 \cos\alpha - u = \sqrt{(c_1^2 + u^2)} \cdot \cos\alpha - u$

$c_1' = 0$

(5) $L_1 u = \frac{u}{g} \sqrt{(c_1^2 + u^2)} \cdot \cos\alpha - u$

Es ist nun:

$$\eta_u = \frac{L_1 u}{c_1^2/2g} = \frac{\frac{u}{g}\sqrt{(c_1^2 + u^2)} \cdot \cos\alpha - u}{c_1^2 / 2g}$$

(6) $$\eta_u = 2\frac{u}{c_1}\left(\sqrt{1 + \left(\frac{u}{c_1}\right)^2} \cdot \cos\alpha - \frac{u}{c_1}\right)$$

$$\eta_u = 0 \begin{cases} \text{für } \frac{u}{c_1} = 0 \\ \text{für } \frac{u}{c_1} = \cot\alpha \text{ (Durchgangsdrehzahl).} \end{cases}$$

Berücksichtigung der Strömungsverluste.

Fasst man Stoss und Reibungsverluste in ψ zusammen, so ist $w_2 = \psi \cdot w_1$ und man erhält

(7) $$\eta_u = 2\frac{u}{c_1}\left(\psi \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{u}{c_1}\right)^2} \cdot \cos\alpha - \frac{u}{c_1}\right)$$

Für die Durchgangsdrehzahl ist

(8) $$\frac{u}{c_1} = \sqrt{\frac{\psi^2 \cos^2\alpha}{1 - \psi^2\cos^2\alpha}}$$ welcher Ausdruck bei $\psi = 1$ in den oben angegebenen Ausdruck für reibungsfreie Strömung übergeht.

Der Koeffizient ψ ist unbekannt, im vorliegenden Fall auch der Winkel α, da nach Beendigung der Versuche gelegentlich einer Reparatur die Winkel unnötigerweise geändert worden waren.

Löst man nach $\psi \cdot \cos\alpha$ auf, so ist dieser Ausdruck nur vom Wert u/c_1 der Durchgangsdrehzahl abhängig

$$\psi \cdot \cos\alpha = \frac{u/c_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{u}{c_1}\right)^2}}$$

Das Verhältnis $\frac{u}{c_1}$ der Durchgangsdrehzahl lässt sich aber leicht aus der Eichkurve des Anemometers ermitteln.

Nimmt man nun ψ in Annäherung für alle Geschwindigkeiten

konstant an, so lässt sich der für die Durchgangsdrehzahl erhaltene Wert von $\psi \cos \alpha$ in die Wirkungsgradgleichung (7) einsetzen; sodass η_u abhängig von $\frac{u}{c_1}$ bestimmt werden kann. Abb. 17 Hierbei wurde für $\psi \cos \alpha$ der Zahlenwert 0,744 eingesetzt.

Bei der ersten Durchrechnung war für $\psi \cos \alpha$ der genaue Tangentenwert aus der Eichgeraden No.19172 eingesetzt worden, welcher theoretisch der Durchgangsdrehzahl entsprechen würde. Nun ergab aber die theoretische Eichkurve eine schwach gekrümmte Linie. Deshalb wurde $\psi \cos \alpha$ in geringen Grenzen auf obigen Wert abgeändert, um zu erreichen, dass die mittlere Richtung der schwach gekrümmten Kurve mit der empirischen Eichgeraden zusammenfiel.

Zur Ermittlung der theoretischen Eichkurve trägt man nun für eine konstante Umfangsgeschwindigkeit abhängig von c_1 die Umfangsleistung $L_u = L_o \cdot \eta_u$ auf, wobei η_u dem jeweiligen u/c_1 Verhältnis entspricht und erhält so die Kurvenscharen der Abb. 18. Über die Reibungsleistung L_R des Anemometers ist nun noch nichts bekannt. Sie soll linear mit der Umfangsgeschwindigkeit wachsend zunächst willkürlich angenommen werden. Bei einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit muss nun $L_R = L_u$ sein, woraus sich die zugehörige Luftgeschwindigkeit c_1 ergibt und sich dann die Eichkurve punktweise aufzeichnen lässt. Es wird so eine zur u-Achse konvexe Kurve erhalten, die für höhere Werte von u asymptotisch in eine Gerade übergeht. Die Richtung dieser Geraden ist wie erwähnt, hauptsächlich durch $\psi \cos \alpha$ festgelegt, während die Annahme von L_R die Lage bestimmt. L_R ist demnach so zu wählen, dass die theoretische Eichkurve auch der Lage nach möglichst mit der empirischen Eichgeraden zusammenfällt. Abb. 19. — Das spezifische Gewicht hat nach Gleichung (3) einen proportionalen Einfluss auf L_o und damit auf L_u. Der Einfluss auf die Eichkurve ergibt sich aus obigem Zusammenhang. Dabei ist es einfacher, nicht L_u im Verhältnis der spezifischen Gewichte zu ändern, sondern die Reibungsleistung L_R im umgekehrten Verhältnis, wobei sich die gleichen Schnittpunkte ergeben müssen. Abb. 20.

Das Diagramm, Abb. 16, gibt das Endergebnis der Untersuchung wieder. Der Fehler durch veränderte Temperatur ist bei hohen Luftgeschwindigkeiten zu vernachlässigen, steigt aber bei

kleinen Luftgeschwindigkeiten hyperbolisch an, bis er bei der Anlaufwindstärke den Wert ∞ erreicht.

VI. Vorversuche.

a). Analysen in den Kesselzügen.

Bei Kesseln mit natürlichem Zuge lässt sich die Gesamt-Luftmenge durch direkte Messung schlecht bestimmen. Es bleibt hier gewöhnlich nur der Weg, aus den Rauchgasanalysen die Luftüberschusszahl zu ermitteln. Will man die durch den Rost hindurchtretende Luftmenge haben, so ist dieser Weg ungenau, weil durch die Undichtigkeit des Mauerwerkes weitere Luft hinzugekommen ist. Um über die Lässigkeit der Kesseleinmauerung ein Bild zu gewinnen, wurden Ende Oktober 1931 gleichzeitig Orsat-Analysen der Rauchgase hinter Ueberhitzer und hinter Economiser durchgeführt, bei welchen die Gasabsauge-Stelle 10 - 15 cm von der Wand entfernt war. Darauf wurde der ganze Kessel mit Wasserglas angestrichen und die Versuche wiederholt. Die Werte der Tabelle (jeweils Mittelwerte aus 15 Analysen) zeigen deutlich die Verbesserung durch den Wasserglasanstrich.

Ort der Gas-entnahme.	Vor dem Anstrich		Nach dem Anstrich	
	CO_2 %	O_2 %	CO_2 %	O_2 %
Hinter Ueberhitzer	14	5,4	14,4	4,9
Hinter Economiser	12	7,3	13,4	5,9

Schob man die Absaugestelle bis zur Mitte des Rauchgaskanals vor, so ergaben die Analysen keine gleichmässige Abnahme des CO_2-Gehaltes. Es wurde hieraus geschlossen, dass die durch das Mauerwerk dringende Luft nicht bis zur Kanalmitte vordringt. Bei den Hauptversuchen wurde deshalb stets in der Kanalmitte abgesaugt; ausserdem wurde noch eine dritte Absauge-Stelle vor dem Economiser eingerichtet.

b), Untersuchungen über die Gleichmässigkeit des Ausbrandes.

Die Versuche sollten bei gleicher Schütthöhe und konstanter Rostgeschwindigkeit durchgeführt werden. Der Kessel war im Winter durch den Heizungsbetrieb in den Vormittagsstunden

grösstenteils gleichmässig belastet. Falls nicht Sonderversuche in anderen Laboratorien der Hochschule (Walzen im Hüttenmännischen Institut) vorgenommen wurden, blieben die Lastschwankungen unter 0,2 to/std. bei 4,6 to/std. normaler Last. Man sollte annehmen, dass ein gleichmässiger Feuerungsbetrieb unter diesen Umständen keine Schwierigkeiten bereiten würde. Das war aber nicht der Fall.

Das glühende Kohlenbett pendelte auf dem Rost hin und her, schob sich bis an das Staupendel heran, um kurz darauf wieder stark abzubrennen. Naturgemäss hatte dieses Schwanken des Brennstoffbettes Einfluss auf den Kessel. Trat die Glutschicht bis an das Staupendel heran, so stiegen die Temperaturen und der Kesseldruck sowie umgekehrt. Der Heizer, welcher zu fortwährendem Regulieren des Vorschubs neigte, musste zum Zwecke der Versuche angelernt werden, diese Schwankungen des Kesseldrucks durch die Kesselspeisung auszugleichen.

Ferner wurden Kessel und Rostbelastung sowie Schichthöhe und Vorschub so gewählt, dass das Brennstoffbett niemals in dicker Glutschicht das Staupendel erreichte, da in diesem Falle die Glutschicht kurz darauf stets etwa 3/4 m vor dem Pendel durchzubrennen begann, während sich noch lange ein dicker Glutberg vor dem Staupendel hielt und die Rostglieder zu hellster Rotglut brachte. Es liess sich also kurz gesagt der Zweck des Staupendels gar nicht ausnutzen.

Auch über die Breite des Feuerbettes fand ein ungleichmässiger Abbrand statt. Ursprünglich brannte die Kohle seitlich viel schlechter ab als in der Mitte, indem hier lange Glutstreifen vorragten. Eine Änderung des Brennstoffschiebers seitlich durch Blechunterlagen, wodurch die Schichthöhe 9 mm niedriger wurde, hatte das Gegenteil, zu starkes Abbrennen an den Seiten, zur Folge. Bei 5 mm Blechunterlage brannte bei der normal betriebenen Schichthöhe von 70 mm die Kohle ziemlich gleichmässig ab; bei höheren Schichthöhen dagegen seitlich noch stärker, sodass das Anbringen einer verstellbaren Blende in der Schiebermitte (siehe Abb. 5) vorgenommen wurde, die bei 110 mm Schichthöhe um 2 - 3 mm vorgeschoben wurde, da sonst ein Betrieb mit dieser hohen Schichthöhe unmöglich war. Diese Ergebnisse zeigen, wie empfindlich der Abbrand gegen eine Änderung der Schütthöhe am

wenige Millimeter ist.

Auf eine eigenartige Erscheinung des Abbrandes sei noch hingewiesen. Wie das Lichtbild Abb. 21 zeigt, brannte die Kohle namentlich bei niedrigen Schütthöhen in Querstreifen ab. Loschge[14] fand seinerzeit ein äusserlich ähnliches Verhalten, das aber ganz andere Gründe hatte (Schlackeneinflüsse). Während dort der Glutstreifen in der Rostgliedmitte sich befand, wo die Schlackenkuchen nicht wie an den Enden durch kleine Bewegungen der Rostlagen gegeneinander durchbrochen wurden, befand sich hier der Glutstreifen gerade am Ende des Rostgliedes. Wie Abb. 22 zeigt, bewirkt die Form des Rostgliedes einen Wärmestau am spitzen Ende, wodurch bei starker Beanspruchung der Rost hier verschmort und verschlackt und dem Durchtritt der Luft grösseren Widerstand entgegensetzt.

Während über die Feuerbreite hin durch einfache konstruktive Massnahmen sich eine grössere Gleichmässigkeit des Abbrandes erzielen liess, zeigten die Vorversuche, dass dies über die Rostlänge hin nicht möglich war. Es wurden mit dem beschriebenen Absaugerohr mit Filter und einem registrierenden Mono-Apparat CO_2-Analysen der Gase in verschiedener Entfernung vom Brennstoffschieber durchgeführt, die zeitlich einen so stark schwankenden Verlauf auf dem letzten Rostteil zeigten, wie er trotz der mitgeteilten Beobachtungen in diesem Ausmass nicht erwartet worden war.(Abb. 23.)

Bei einer zeitlich derart schwankenden Gaszusammensetzung ist es unmöglich, durch die Absaugung den wirklichen Mittelwert zu erhalten, da den veränderlichen Gaszusammensetzungen verschiedene Gasgeschwindigkeiten entsprechen. Durch auf diese Weise erhaltene falsche Mittelwerte traten bei der Untersuchung von Hausbrandöfen nach Brabbée[15] Fehler bis zu 50 % in der Bilanz auf. Diese Fehler sind stets positiv; man stellt zuviel Verbrennungsprodukte in den Abgasen fest. Pohl[16] hat ein Verfahren ausgearbeitet, das auf zeitlicher Registrierung von Rauchgasanalyse und Rauchgasmenge beruhend, bei Zimmeröfen die genaue Bestimmung des Mittelwertes der Analyse gestattet. Dieses Verfahren ist jedoch im vorliegenden Falle nicht durchführbar.

VII. Hauptversuche.

a) Ausführung der Messungen.

Statt die Untersuchung auf längere Zeit auszudehnen und an jeder Mess-Stelle in unvollkommener Weise zu versuchen, an den zeitlichen Mittelwert der Gaszusammensetzung heranzukommen, wurde die Untersuchung des Verbrennungsverlaufes ein und derselben Kohlenmenge ins Auge gefasst. Die Versuchsdauer wird damit auf die Zeit für den Hingang des Wanderrostes begrenzt und man erhält so die Möglichkeit, den Versuch an einem Vormittag ein oder mehrere Male zu wiederholen.

Mit den bereits beschriebenen Instrumenten wurde die Untersuchung in der Weise ausgeführt, dass man das Absaugerohr jeweils an die Stelle verschob, die vom Anemometer im nächsten Augenblick erreicht wurde. Durch Anbringen von 11 Messmarken auf dem Absaugerohr, deren Abstände (368 mm) den von der Wanderrostwelle gegebenen Kontakten (3 Kontakte/Umdrehung) entsprachen, liess sich dies leicht machen. Die Zeitdauer der Absaugung wurde dabei so knapp bemessen, dass der Rost sich nur um wenige Zentimeter unter der Absaugeöffnung vorschob; zum mindesten befand sich die Absaugeöffnung stets über der vom Flügelrad bestrichenen Fläche während der Gasentnahme.

Abb.24 gibt ein Bild der Anordnung zum raschen Absaugen. Vor dem Abfüllen der Gasflasche wurde mittels Strahlpumpe der Gasinhalt des Absaugerohrs durch den Schwanzhahn der Sammelflasche abgesaugt. Durch einfache Hahnumstellungen wurde dann die Gasflasche abgefüllt, wobei die Strahlpumpe das natürliche Gefälle der Sperrflüssigkeit durch Absaugen der Luft aus der großen Sperrwasser-Sammelflasche sehr wirksam vermehrte. Die Absaugezeit betrug bei ca. 2 mm lichter Weite der Hahnbohrungen ca. 20 - 30 sec (Flascheninhalt 750 ccm). Bei der höchsten untersuchten Rostgeschwindigkeit reichte diese Zeit noch aus.

Durch Beobachtung der Feuerschicht mit geschütztem Auge, was an einigen Stellen möglich war, wurden schmale blaue Flammen von grösserer Länge festgestellt. Es ist also auch bei der angewandten Methode kürzester Absaugezeit noch möglich, dass Strähnen verschiedener Gasgeschwindigkeit von der Absaugeöffnung angeschnitten werden, wodurch nach Früherem ein falscher Mittelwert erhalten wird. Dieser Fehler lässt sich vermeiden,

wenn die Absaugeöffnung in genügende Höhe über die Brennstoffschicht gebracht wird. Obschon die Versuchseinrichtung ohne weiteres eine Änderung der Höhenlage der Absaugung gestattete, wurde jedoch bei der untersuchten Feuerung mit langem Zündgewölbe hiervon abgesehen, da hier eine sehr starke mit der Höhe zunehmende Horizontalkomponente der Luftgeschwindigkeit unter dem Zündgewölbe vorhanden ist. Damit Gasanalysen und Anemometermessungen in Beziehung miteinander gebracht werden konnten, wurde stets in etwa 8 - 10 cm Höhe über der Schicht abgesaugt.

Schon gleich bei den ersten Versuchen zeigte sich an der Färbung der Gasflaschen, dass der so grosse Schwierigkeiten verursachende Russgehalt der Feuergase nur in einem begrenzten Gebiet der Feuerung vorhanden war. (Abb. 7). Zur zahlenmäßigen Feststellung des Russgehaltes wurde das Feuergas ähnlich dem Vorgehen von Kuhn[17)] durch hintereinandergeschaltete mit Benzin gefüllte Waschflaschen gesaugt. Ein hinter die Waschflaschen geschaltetes Wattefilter zeigte an, ob noch Russmengen durch das Benzin hindurchgerissen wurden. Bei nicht zu kräftigem Absaugen wurden nur geringe Spuren festgestellt. Das Benzin der Waschflaschen wurde abfiltriert. Die Filterblätter wurden vorher 2 Stunden bei 105 °C getrocknet und unter Luftabschluss auf einer Laboratoriumswage gewogen. In gleicher Weise wurde nach dem Abfiltrieren verfahren. Der im Absaugerohr abgeschiedene Russ wurde mit Benzin abgewaschen, in gleicher Weise bestimmt und anteilig auf die an den einzelnen Messpunkten ermittelten Rußmengen verteilt. Die im Wattefilter abgeschiedene Russmenge war so gering, dass sie vernachlässigt werden konnte.

b) Übersicht über die Messungen.

Die Hauptversuche fanden im Frühjahr 1932 statt und zwar am 18.3., 8.4., 13.4., 16.4., 20.4. und 11.5. 1932. Sie wurden mit Schichthöhen von 5, 7, 9 und 11 cm ausgeführt, wobei im letzteren Falle die Schichthöhe in Mitte durch Verstellen der Blende zwecks gleichmäßigeren Ausbrandes nur 10,8 cm betrug. Die Zahlentafeln 1 - 4 geben die Messwerte wieder. Die Gasabsaugung über dem Rost geschah an 11 verschiedenen Stellen (siehe Abb. 1) etwas rechts von der Rostmitte über der Anemometermessstelle IV in 8 - 10 cm Höhe oberhalb der Schicht.

Die Hauptversuche wurden durch verschiedene Einzelmessungen ergänzt, die zum Teil jedoch erst in der folgenden Heizperiode W.S. 1932/33 ausgeführt werden konnten. Von diesen Einzelmessunge wurden die Temperaturmessungen der Luft unter dem Rost und die der Roststabtemperaturen gleichzeitig ausgeführt und zwar ebenfalls für die vier untersuchten Schichthöhen. Die Russgehaltsbestimmung der Feuergase, sowie die Temperaturmessung im Feuerraum wurde dagegen nur für eine Schichthöhe und zwar für die normal betriebene Schichthöhe von 7 cm vorgenommen.

c) Die untersuchte Kohle.:

Verfeuert wurde oberschlesische Erbskohle der Zechen Hedwigswunsch und Ludwigsglück, Borsigwerk A.-G. Die im Maschinenlaboratorium durch einen Chemiker ausgeführten Brennstoffanalysen nach Dennstedt wurden durch das Schlesische Kohlenforschungsinstitut der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft in Breslau und durch das Laboratorium von Dr.Ing. K. Barth, Beuthen O.S., nachgeprüft. Dabei ergaben sich etwas geringere Werte für den Wasserstoffgehalt der Kohle. Dies war nach den Ergebnissen der Orsat-Analysen schon vermutet werden und ist somit ein Beweis für die Genauigkeit der Gasanalysen. Die Zahlentafel 5 gibt das geprüfte Ergebnis der Brennstoffuntersuchung wieder.

Die Kohle wurde unmittelbar von der Zeche angeliefert und nach kurzer Lagerung im Bunker verfeuert. Nur beim Versuch mit 110 mm Schütthöhe vom 11.5.32 wurde ganzjährig gelagerte Kohle verwandt, da eine Verfeuerung der frischen Kohle in so hoher Schicht nicht möglich war, weil das Backen der Kohle sich hier zu stark bemerkbar machte und den Ausbrand verzögerte. Wie man aus der Tabelle ersieht, war der Gasgehalt und der Wasserstoffgehalt der vorjährigen Kohle geringer, worauf wohl die veränderte Backfähigkeit zurückzuführen ist. Ob dies lediglich ein Einfluss der langen Lagerung ist oder ob die Kohle auch schon in frischem Zustande sich anders verhalten haben würde, ist natürlich nicht sicher zu entscheiden.

VIII. Auswertung und Ergebnis der Messungen.:

1) Roststabtemperaturen:

Die Abbildungen 26 und 27 zeigen den Verlauf der Roststabtemperaturen für die vier untersuchten Schichthöhen bei Stellung

0 des Luftregulierschiebers. Die Kurven geben zunächst Aufschluß über die Durchzündung der Kohleschicht. Diese ist dort beendet, wo der Temperaturanstieg beginnt. Benennt man nach Rosin[18] das Verhältnis von Zündlänge zur gesamten Rostlänge mit Zündverhältnis λ , so ergibt sich hierfür ein Wert von höchstens 32 %. Bis auf eine Ausnahme ist λ auch für alle Schütthöhen nahezu gleich. Die mittlere Durchzündgeschwindigkeit der Schicht beträgt etwa 10 mm je min.

Der Höchstwert der Roststabtemperatur nimmt mit steigender Schütthöhe zu, und zwar bei einer Steigerung der Schütthöhe um 20 mm etwa um 60 - 70 °C. Die Versuche d_1 und d_2 mit der höchsten Schichthöhe von 110 mm fallen allerdings heraus und zeigen ein uneinheitliches Ergebnis. Dies entspricht durchaus dem wirklichen Verhalten der frischen Kohle bei Verfeuerung mit hoher Schicht, wie bei den Vorversuchen erwähnt wurde. Hier hatte sich nämlich gezeigt, dass bei hoher Schicht häufig das Brennstoffbett bis an das Staupendel heranwuchs, sodass der Rost stillgesetzt werden musste. Diesen Zustand der Feuerung würde Kurve d_2 wiedergeben, bei welcher der Höchstwert der Roststabtemperatur sich ganz bis zum Rostende verlagert hat. Zuweilen aber brennt die Kohle wieder besser ab, wie Versuch d_1 mit geringerem Höchstwert der Roststabtemperatur zeigt, obwohl mit gleicher Rostgeschwindigkeit und gleichen Zugverhältnissen gefahren wurde wie bei Versuch d_2. Die Ursache für dieses Verhalten muss in veränderter Körnung und Zusammensetzung der Kohle gesucht werden. Dabei handelt es sich aber um Erscheinungen, die gleich nach dem Durchzünden der Schicht eintreten, wie der deutlich erkennbare Knick im Anstieg der Roststabtemperatur bei Versuch d_2 zeigt. Wahrscheinlich haben wir es hier mit den gleichen Vorgängen zu tun, von denen Schulte und Tanner[28] berichten, wonach Presser eine starke Behinderung des Luftdurchtrittes durch Plastischwerden gashaltiger Kohle bei größerem Gehalt an Feinkohle festgestellt hat. Der Knick im Anstieg der Temperatur würde demnach auf Verlangsamung der Verbrennung infolge verringerter Luftzufuhr hinweisen. Da durch das Aussieben der Feinkohle ein viel gleichmäßigerer Abbrand erzielt wird, wird man den Rost viel höher belasten können. Dies wird auch durch Versuche von Rosin, Rammler und Wesemann bestätigt, die auf diese Weise eine um

25 % höhere Belastung erzielten. Auch der Gasgehalt übt einen Einfluss auf diese Erscheinungen aus. Bei den Hauptversuchen wurde für die höchste Schicht, wie bereits erwähnt, ganzjährig gelagerte Kohle mit etwas geringerem Gasgehalt verfeuert, die viel gleichmäßigeren Abbrand zeigte.

2) Lufttemperatur unter dem Rost.

Die Höhe der Lufttemperatur unter dem Rost war zu Beginn der Versuche unterschätzt worden. Welche Temperaturen hier auftreten, zeigt Abb. 28 in Abhängigkeit vom Rostvorschub. Die Lufttemperatur wurde hierbei in einer Höhe von 70 mm unterhalb der unteren Rostkante gemessen. Man könnte trotz des beschriebenen sorgfältigen Strahlungsschutzes noch Zweifel haben, ob wirklich derartig hohe Temperaturen auftreten. Eine kurze rechnerische Untersuchung bestätigte aber der Größenordnung nach die ausgeführten Messungen.

Gewicht einer Rostlage: ..... 90 kg

Länge der Rostlage: ..... 0,22 m

Erwärmtes Rostgewicht bei Gang 5: $90 \times \frac{10,85}{0,22} =$

$= 4440$ kg/std.

Spez.Wärme des Eisens: 0,115 WE/kg u.°C.

Abkühlung des Rostes auf dem Rückwege um ca.: 450 °C.

Die von der Luft abzuführende Wärmemenge beträgt also:

$Q = 0,115 \times 4440 \times 450 = 230\,000$ WE/std.

Gesamt-Luftdurchsatz durch den Rost bei Normallast

$L = 8.400$ m³/std (0° 760)

$G = 1,293 \times 8.400 = 10.850$ kg/std.

Mit einer spezifischen Wärme der Luft von $c_p = 0,24$ WE/kg und °C ergibt sich bei gleichmäßiger Erwärmung eine Temperaturerhöhung um

$$t = \frac{Q}{G \cdot c_p} = \frac{230.000}{10.850 \cdot 0,24} = 88,3\ ^{\circ}C.$$

Bei einer Kesselhaustemperatur von 25 °C würde die Lufttemperatur demnach über 113 °C betragen. Da aber die gesamte Luftmenge nicht gleichmäßig erwärmt wird, so müssen noch erheblich höhere Temperaturen auftreten.

Zu der Erwärmung der Luft durch den heißen Rost kommt nun noch die Erwärmung durch Rostdurchfall und heiße Schlacke. Der steilere Anstieg der Lufttemperatur am hinteren Ende (Abb. 28)

findet hierin seine Begründung.

Diese beträchtliche Erwärmung der Luft durch das rückkehrende Rostband ist bisher noch nicht genügend beachtet worden, obschon die Folgen dieser Erwärmung für den Feuerungsbetrieb von erheblicher praktischer Bedeutung sind. Es ist bekannt, daß bei Wanderrosten ohne Unterwind der Rostbelag auf dem letzten Teil des Brennweges erheblichen Temperaturen ausgesetzt ist, die man durch Kühlung mit Dampf bezw. Wasserbrausen herabzusetzen sucht.[19] Ein weit einfacheres Mittel wäre die Schaffung genügend grosser Öffnungen in der Kesselseitenwand, die der Luft auf dem letzten Rostteil den unmittelbaren Zutritt zwischen die beiden Rostbänder gestatten würden. Die Rückkühlung des Rostes könnte auf dem vorderen Rostteil vorgenommen werden. Auf diese Weise liesse sich der Rost in einfacher Weise als Luftvorwärmer benutzen. Auch der Zonenunterwind-Wanderrost könnte nach diesem Gesichtspunkte gebaut werden, indem die Luft je nach Wahl durch das untere Rostband hindurch oder zwischen die Rostbänder geleitet würde, sodass die abgestufte Luftvorwärmung, die verschiedentlich gefordert worden ist,[20 u.21] sich mit einfachen Mitteln verwirklichen liesse. Praktisch hat man bisher allzu grossen Wert darauf gelegt, dass die Roste vorne nicht heisser als handwarm ankamen. Der Verlauf der Roststabtemperaturen zeigt, dass man in diesem Punkte viel unbesorgter sein kann.

In welcher Weise die Lufttemperatur den Luftdurchsatz durch den Rost beeinflusst, wird aus dem nächsten Abschnitt ersichtlich. Es sei aber schon hier erwähnt, dass die früher angeführte Unmöglichkeit, das Staupendel seinem Zweck entsprechend, richtig auszunutzen, zum Teil ebenfalls durch die Lufttemperatur bedingt ist. Reicht nämlich die Glutschicht bis an das Staupendel heran, so verlagert sich der Höchstwert der Roststabtemperatur nach dem Ende des Rostes zu, sodass die ganze Rostwärme auf dem Rückwege abgeführt werden muss. Die dadurch bedingte steigende Lufttemperatur hinten unter dem Rost veranlasst wieder ein weiteres Ansteigen des Maximums der Roststabtemperatur bis zu einer solchen Höhe, dass der Betrieb nur bei stärkster Schädigung des Roststabmaterials aufrecht erhalten werden kann.

3) Anemometermessungen.

Bei der Auswertung der Anemometermessungen ergab sich eine unerwartete Schwierigkeit. Wie die aufgetragenen Mess-Ergebnisse zeigen (Abb.29-39) (Auswertung der registrierten Kontakte mittels Treppenkurven), wurden auf dem hinteren Teil des Rostes stark voneinander abweichende Ergebnisse für gleichzeitige Messungen erhalten, obwohl die beiden Anemometer stets an unmittelbar benachbarten Messstellen (z.B. IV und V) sich befanden. Da die Form der Abweichungen bei gleicher Einstellung des Luftschiebers stets wiederkehrte, wurde dieser näher untersucht. Aus der Abb. 2 erkennt man, wie der Mittelträger die gleichmäßige Luftverteilung stört. Es ist anzunehmen, dass unter dem Rost und auch noch in der Kohleschicht ein gewisser Ausgleich der verschiedenen Luftgeschwindigkeiten eintritt. Zur weiteren Auswertung wurde deshalb der Mittelwert beider Messungen genommen. Diese mittleren Schaulinien wurden mit Hilfe der Fehlerkurven Abb. 16 abhängig von der Lufttemperatur Abb. 28 verbessert und das Ergebnis alsdann im Verhältnis der absoluten Temperaturen auf die gleichmäßig Temperatur von 20 °C reduziert. Der auf diese Weise in den Abb. 40 - 50 erhaltene Verlauf des Linienzuges W_{20} der theoret. Luftgeschwindigkeit bei 20 °C stellt demnach die Luftgewichtsverteilung unter dem Rost etwa in Rostmitte dar. Die Veränderung der Luftverteilung durch den Einfluss der Temperatur ist recht erheblich.

In den aufgetragenen Messergebnissen ist der Rostweg vom Schichtregler aus gerechnet, sodass der Ursprung des Achsenkreuzes die dem Feuerraum zugekehrte Innenseite des Schichtreglers angibt. Der Durchtritt der Luft durch den Rost beginnt schon vorher. Diese Luft muss unter dem Schichtregler in schräger Richtung hindurchströmen. Bei einem Blick in die Feuerung erkennt man die stark geneigte Richtung an dem Zuge der kleinen Zündflämmchen hinter dem Schichtregler.

Bei allen Versuchen nimmt die durch den Rost tretende Luftmenge zunächst beim Hineinwandern des Rostes in den Feuerraum rasch zu, erreicht aber bald einen Höchstwert und nimmt dann wieder ab, um nach Erreichen eines Kleinstwertes erneut stark anzusteigen. Es bildet sich also ein ausgesprochener Sattel in der Luftverteilung aus, welcher mit wachsender Schichthöhe um

so ausgeprägter in Erscheinung tritt. Auf dem letzten Teil des Rostes stört der Luftschieber die natürliche Verteilung der Luft, wie sie sich sonst infolge des dauernd abnehmenden Widerstandes des Brennstoffbettes einstellen würde. Vor dem Staupendel müsste der Widerstand der Schicht infolge des Zusammenschiebens des noch nicht ganz ausgebrannten Brennstoffes wieder zunehmen. Abgesehen von dem verschleiernden Einfluss des Luftschiebers könnte sich diese Erscheinung aber bei den vorliegenden Versuchen deswegen nicht zeigen, weil wegen der in den Vorversuchen erwähnten Schwierigkeiten ein fast völliges Ausbrennen der Brennstoffschicht vor dem Staupendel, also ein sogenanntes "Ausbrennen in eine Spitze" angewandt wurde.

Aus dem ersten Teil der Luftverteilungskurven lassen sich schon Einblicke in die Vorgänge gewinnen, die sich auf dem Rost im Brennstoffbett abspielen. Bei der Verkokung backender Kohlen hat sich gezeigt[32], dass die Gasdurchlässigkeit mit der Erweichung der Kohle, die etwa bei 350 - 400 °C beginnt, stark verringert wird. Das Bitumen schmilzt und die Kohle geht in den plastischen Zustand über, es beginnt das Backen und Blähen, wobei starke Entgasung sich einstellt. Bei Beendigung des Blähens tritt eine Wiederverfestigung ein und die Gasdurchlässigkeit erreicht hierbei ihren geringsten Wert[33]. Bei der Wiederverfestigung entsteht der Halbkoks, der nun infolge Nachentgasung bei einer Temperatur von etwa 500 °C in den gewöhnlichen Koks übergeht. Infolge Schwindens und Rissigwerdens des Halbkoks nimmt hierbei die Gasdurchlässigkeit rasch wieder zu. Die beschriebenen Vorgänge werden durch das Schaubild Abb. 73, welches der angeführten Arbeit von P. Schläpfer und E. Müller entnommen ist, erläutert.

Bei der Verbrennung dürften sich Vorgänge ähnlicher Art wie bei der Verkokung abspielen. Wie Grumell[8] festgestellt hat, finden sich frische Kohle, Halbkoks und Koks von unten nach oben übereinanderliegend im Brennstoffbett der Wanderrostfeuerung vor. Entsprechend der Durchzündung geht also auch die Verkokung gewissermaßen schichtweise von oben nach unten fortschreitend vor sich. An jeder Stelle des Wanderrostes wird nun der Gesamtwiderstand der Brennstoffschicht durch den Widerstand der in verschiedenem Verkokungszustand befindlichen einzelnen

Schichten gebildet. Der Widerstand der Brennstoffschicht beim Wanderrost wird deshalb niemals zeitlich so plötzlich ansteigen und abklingen, wie die Gasdurchlässigkeitskurven der Abb. 73 es bei Verkokungsversuchen zeigen. In den Abb. 40 - 50 wird der Widerstand der Brennstoffschicht gegen Luftdurchlässigkeit durch die Sattelbildung vorne in den Luftverteilungslinien veranschaulicht. Das Backen und Blähen der Kohle dürfte demnach sich hauptsächlich in dem Gebiet vollziehen, welches durch den Höchstwert und den Mindestwert der Luftmenge vorne eingegrenzt wird, wenn auch wegen der schichtweise erfolgenden Verkokung die betrachteten Vorgänge sich nach beiden Richtungen hin über diese Grenzen noch hinaus erstrecken können. Jedenfalls ist in der Gegend des Kleinstwertes der Luftgeschwindigkeit keineswegs mehr der größte Teil der Schicht in plastischem Zustand, wie man ohne Kenntnis des Verkokungsvorganges geneigt ist anzunehmen. Man darf dagegen hier an dieser Stelle wohl die größte Halbkoksschicht vermuten. Die verschiedene Körnung des Brennstoffes in den einzelnen Höhenlagen der Schicht bringt allerdings gewisse Verschiebungen mit sich, sodass die Stelle der größten Halbkoksschicht nicht immer genau der Stelle des größten Widerstandes zu entsprechen braucht.

In der Abb. 51 sind die mittleren Luftverteilungslinien für die vier untersuchten Schichthöhen noch einmal zusammengestellt. Der dort angegebene Maßstab für die Luftmenge bedarf noch der näheren Erläuterung.

4) Ermittlung der Gesamtluftmenge und des Maßstabes für die Luftverteilungskurven.

Die Verteilung der durch den Rost tretenden Luftmenge ist durch die Abb. 40 - 50 bekannt; jedoch noch nicht die zahlenmäßige Größe. Den Maßstab der Luftverteilungskurven unter Zugrundelegung des Rostquerschnittes aus der Geschwindigkeit zu errechnen, scheint nicht zweckmäßig, weil einmal der freie Querschnitt unter dem Rost nur annähernd zu ermitteln ist und andererseits nicht feststeht, ob die zur Ermittlung der Geschwindigkeit benutzte Freilaufeichung den Einbauverhältnissen unter dem Rost voll und ganz gerecht wird. Es wurde deshalb die Gesamt-Luftmenge aus der Luftüberschusszahl errechnet und [illegible] gleichset-

zung des erhaltenen Zahlenwertes mit der Fläche der Luftverteilungskurve der Maßstab der letzteren ermittelt.

Mit den Bezeichnungen der "Richtlinien für die Auswertung von Feuerungsuntersuchungen"[22] ergibt sich die Luftüberschusszahl zu:

$$\lambda = \frac{21/79 \cdot n}{21/79\, n - o - k_1 - \frac{k2}{2} + \frac{c}{C_o}(k_1 + k_2)}$$

Verbrennungsprodukte in Raumhundertteilen:

n = Stickstoffgehalt der trockenen Verbrennungsprodukte,
o = Sauerstoffgehalt " " "
k_1 = Kohlensäuregehalt " " "
k_2 = Kohlenoxydgehalt " " "

Brennstoffzusammensetzung in Gewichtshundertteilen:

c = Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes,
C_o = an der Verbrennung teilnehmender Kohlenstoff des Brennstoffes,
H = Wasserstoffgehalt des Brennstoffes
S = Schwefelgehalt " "
W = Wassergehalt " "
A = Aschegehalt " "
$H_d = H - \frac{O}{8}$ disponibler Wasserstoffgehalt des Brennstoffes.

Anmerkung: C_o soll gemäß den Richtlinien[22] sich nach folgender Formel ermitteln lassen:

$$C_o = \frac{(3\, H_d + 3/8\, S + 9/79\, N) \cdot (k_1 + k_2)}{21/79\, n - k_1 - k_2/2 - O}$$

Die Formel ist aber so fehlerempfindlich gegenüber den Orsat-Analysen, daß sie praktisch wohl kaum verwendbar sein dürfte. Mit den Werten:

C = 72	%	H = 5,44	%	A = 7,09	%
N = 0,94	%	S = 0,98	%	O = 7,93	%
W = 5,62	%	k_1 = 9,62	%	k_2 = 0	%
O = 10,05	%	n = 80,33	%		

ergab sich C_o = 79,8 %, also viel zu hoch. Ist dagegen der Sauerstoffgehalt nur um 0,14 % zu hoch ermittelt (ein innerhalb der Fehlergrenze für Orsatapparate liegender Wert), so erhält man ein praktisch mögliches Ergebnis von C_o = 71,1 %.

Die Formel wurde deshalb lediglich zur Prüfung der Orsat- u. Brennstoffanalysen verwendet, wozu sie sich wegen ihrer Fehlerempfindlichkeit sehr gut eignet. (Über die Fehlerempfindlichkeit von Formeln zur Auswertung der Gasanalysen vergleiche Lit.29.)

Im vorliegenden Falle musste C_o demnach durch Abzug des Koksgehaltes in der Schlacke vom Kohlenstoffgehalt C ermittelt werden. (Vernachlässigung von Flugkoksverlusten). Die verbrennlichen Teile im Rostdurchfall wurden als Kohle angesehen und gleich von der Beschickung in Abzug gebracht.

Für die Ermittlung des Verbrennungsverlaufes wurden die Mittelwerte der Analysen aus der zweiten Versuchshälfte benutzt, da hier die Kohle zum Durchbrennen kommt und die Luftüberschusszahl maßgebend beeinflusst wird.

Die theoretische Verbrennungsluftmenge ergibt sich nach den Richtlinien[22] zu

$$L_{th} = \frac{1}{11{,}25} \cdot C \left(1 + \frac{3\,H_d}{C} + \frac{3}{8}\,\frac{S}{C} \right) \quad m^3/kg \ (0^o, 760 \text{ mm})$$

Ist K_{std} die stündlich aufgegebene Kohlenmenge, so erhält man für die in der Minute verbrauchte Luftmenge den Ausdruck

$$L_m = \frac{\lambda \,.\, L_{th} \cdot K_{st}}{60} \quad m^3/min \quad (0^o, 760 \text{ mm})$$

Für den Maßstab der Luftverteilungskurven wurde die Dimension m^3/min u. cm gewählt und darunter die Kubikmeterzahl (0^o, 760 mm) verstanden, die in der Zeiteinheit von einer Minute durch einen Roststreifen von 1 cm Länge hindurchtritt. Da die Luftverteilungskurven von der Rostlänge (cm) abhängig aufgezeichnet sind, ergibt alsdann die planimetrierte Fläche die Dimension m^3/min, kann also ohne weiteres dem Wert L_m gleichgesetzt werden, woraus sich rückwärts der Maßstab in m^3/min u. cm zahlenmäßig ermitteln lässt.

Wenn man von dem geringen Einfluss des Barometerstandes absieht, hätte sich bei allen Versuchen der gleiche Maßstab für die Luftverteilungskurve ergeben müssen. Dies war nicht der Fall; wohl aber ergab sich, wie aus der nachstehenden Aufstellung hervorgeht, annähernd gleicher Maßstab bei allen Versuchen, bei denen der Luftregulierschieber unter dem hinteren Rostteil dieselbe Einstellung hatte.

T a b e l l e 1.

Luftschieber geschlossen.

(Beide Anemometermessungen hinten sehr verschieden vonein ander)

Vers. 13.4.: 1 mm = 0,0075 m^3/min.u.cm (0^o, 760 mm).
Vers. 16.4.: 1 mm = 0,00744 " "
Vers. 11.5.(Nr.7: 1 mm = 0,00747 " "
(Nr.8: 1 mm = 0,00756 " "

T a b e l l e 2.

Luftschieber mehr oder weniger geöffnet.

(Beide Anemometermessungen nicht sehr verschieden.)

Vers. 20.4.: 1mm = 0,00687 m^3/min.u.cm (0^o, 760 mm).
Vers. 18.3.: 1mm = 0,00691 " "
Vers. 8.4.: 1mm = 0,0067 " "

Ohne Zweifel entspricht der Maßstab der Tabelle 2 dem wirklichen Maßstab weit mehr, denn da die Störung der Luftverteilung nur einmal in der Mitte des Rostes durch den Tragbalken stattfindet, so ist bei geschlossenem Luftschieber der Mittelwert aus beiden Anemometermessungen kleiner als dem mittleren Luftdurchsatz durch den Rost entspricht, woraus sich der größere Maßstab der Tabelle 1 zwanglos erklärt.

Für die Auswertung wurde ohne Rücksicht auf den Barometerstand der Maßstab:

1 mm = 0,0069 m^3/min u. cm

gleichmäßig zugrundegelegt.

Anmerkung: Es sei der Versuch gemacht, den Maßstab, wie schon erwähnt, aus der Geschwindigkeit unmittelbar zu errechnen.

Der freie Querschnitt unter dem Rost betrug etwa 80 % des gesamten Querschnittes. Bei 1.2 m Breite unter dem Rost ergibt sich je cm Rostlänge der freie Querschnitt

$F_1 = 1,2 \cdot 0,001 \cdot 0,8 = 0,0096$ m^2/cm Länge.

Bei 1 m/min. Luftgeschwindigkeit ist die durchtretende Luftmenge

(1) $L = 0,0096$ m^3/min u. cm.

Die vorstehende Betrachtung hatte dagegen den Maßstab ergeben:
1 mm = 1 m/min (bei 20^oC) = 0.0069 m^3/min.u.cm(0^o,760)

Bei auf $0^{o}C$ reduzierter Luftgeschwindigkeit würde dieser Maßstab lauten:

(2) 1 mm = 0,0069 . $\frac{293}{273}$ = 0,0074 m^3/min u.cm(0^{o},760)

Die auf zweierlei verschiedene Weise erhaltenen Maßstäbe (1) und (2) geben demnach ganz ausserordentliche Abweichungen. Man muß aber hierbei im Auge behalten, dass der Unterschied zwischen Freilauf und Zwanglaufeichung(Abb.14 und 15) im betrachteten Bereich etwa 35 % beträgt. Bei Benutzung der Zwanglaufeichung zur Auswertung hätte sich statt des Wertes 0,0074 der Wert 0,0114 m^3/min.u.cm für den Maßstab ergeben.

Der aus dem freien Rostquerschnitt ermittelte Maßstab liegt also zwischen den beiden Werten für Zwanglauf- und Freilaufeichung,sodass für eine streng korrekte Eichung eine genaue Nachahmung der Einbauverhältnisse vorgenommen werden müßte. Es ist aber mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen,dass diese Eichung der Freilaufeichung proportional ist,womit dann die durchgeführte Methode der Auswertung ihre Berechtigung einwandfrei erhalten würde.

5) Gasanalysen über dem Rost.

In der Zahlentafel 4 sind die ermittelten Gaszusammensetzungen wiedergegeben. Das Versuchsergebnis von Vers. 4 ist außerdem in Abb. 52 übersichtlich aufgetragen. Der Prozentgehalt an unverbrannten Gasen (CO und H_2) ist vorne sehr groß, dabei ist zu beachten, dass infolge der möglichen Nachverbrennung während des Absaugens der wirkliche Gehalt an unverbrannten Gasen noch höher, in keinem Falle aber niedriger sein kann. Schwere Kohlenwasserstoffe wurden nirgends festgestellt, Methan nur in Spuren. Bei Messungen unmittelbar über der Glutschicht war der Methangehalt etwas grösser. Es ist anzunehmen, dass infolge der hohen Temperatur eine Zersetzung des Methans in Kohlenstoff und Wasserstoff eintritt, da dieselbe nach Aufhäuser[23)] bei 1000 ^{o} sehr stark und bei 1300 ^{o}C vollkommen ist.

6) Russgehalt der Feuergase.

Durch die Annahme der Zersetzung des Methans wird neben dem hohen Wasserstoffgehalt auch der hohe Russgehalt vorne in der Feuerung verständlich. Die Zahlentafel 6 gibt die durch Versuch ermittelten Werte an. Wie die weitere Auswertung ergeben wird, werden annähernd bis zu 5 % des gesamten Kohlenstoffs der Kohle als Russ festgestellt. Es sei an dieser Stelle aber schon

darauf hingewiesen, dass dieser Russ weiter oben im Feuerraum noch zur Verbrennung gelangt.

In geringem Maße wurden bei der Rußgehaltsbestimmung auch Dämpfe erkannt, welche das benutzte Benzin gelblich färbten.

1) Zugmessungen.

Die Ergebnisse der Zugmessungen sind in der Zahlentafel 1 enthalten. In Abb. 53 sind ferner die Ergebnisse noch einmal aufgetragen. Etwa 25 % des Zugbedarfes für den Rost werden schon benötigt, um die Luft unter das obere Rostband gelangen zu lassen. Die Zugverhältnisse im Feuerraum begünstigen eine Mischung der vorne entwickelten unverbrannten Gase mit dem Luftüberschuss hinten. Hier macht sich der günstige Einfluss des langen Zündgewölbes bemerkbar. Trotz des hohen Gehaltes an unverbrannten Gasen und Ruß brennen die Feuergase gut aus, wie die Analysen hinter Überhitzer, vor und hinter Economiser zeigen. Da vor dem Überhitzer kein Gas entnommen werden konnte, sind allerdings Nachverbrennungen im Überhitzer nicht ausgeschlossen.

Insgesamt ist der Zug über dem Rost mit 3 mm ziemlich niedrig, sodass die Lieferfirma des Rostes gegen die Durchführung der Versuche Bedenken hatte. Der Zug reicht aber zur Verbrennung vollkommen aus. Die Bedenken der Lieferfirma waren aber insoweit berechtigt, als sie die Haltbarkeit der Roststäbe betrafen.

IX. Ermittlung des Verbrennungsverlaufes.

1) Formeln.

Zum Auswerten der Rauchgasanalysen und der Luftverteilungskurven dienen folgende Formeln:

(1) $CO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4 + N_2 = 100$, worin die chemischen Sinnbilder die trockenen Verbrennungsprodukte in Raumhundertteilen darstellen.

a) Zum Verbrennungsverlauf des Kohlenstoffes.

(2) $10(CO_2 + CO + CH_4) \cdot 0{,}536 = c$ gr Kohlenstoff je m^3 tr. Rauchgas.

Lm = Nm^3 Luft/min u. cm Rostlänge

(Nm^3 = Normalkubikmeter bei 0^0 und 760 mm Hg)

(3) $\frac{79}{N_2} \cdot Lm = R_m$ Nm^3 tr. Rauchgas/min u. cm Rostlänge

(4) $c \cdot R_m = C_m$ gr Kohlenstoff/min u. cm Rostlänge.

b) Zum Verbrennungsverlauf des Wasserstoffes.

Es werde nur der disponible Wasserstoff $H_d = H - \frac{O}{8}$ betrachtet. Dann lässt sich der verbrannte Wasserstoff aus dem verschwundenen Sauerstoff bestimmen.

(5) $1{,}786 \left\{ \frac{21}{79} \cdot N_2 - (O_2 + CO_2 + \frac{CO}{2}) \right\} = h_v$ gr. verbr. Wasserstoff/Nm^3 tr.Rauchgas

(6) $0{,}893 \cdot H_2 + 1{,}786\ CH_4 = h_u$ gr unverbr.Wasserstoff je Nm^3 tr. Rauchgas

$h = h_u + h_v$ = gesamter Wasserstoff/Nm^3 tr.Rauchgas

(7) $h \cdot R_m = H_m$ gr. Wasserstoff/min u.cm Rostlänge.

c) Theoretischer Luftbedarf.

(8) $\underbrace{\frac{N_2}{0{,}79}}_{\text{zugeführte Luft}} + \underbrace{\frac{1}{0{,}21}(0{,}5\ CO + 0{,}5 H_2 + 2 CH_4)}_{\text{Luftbedarf der brennbaren Bestandteile}} - \underbrace{\frac{O_2}{0{,}21}}_{\text{übersch. Luft.}} = L_o$ Nm^3 Luftbedarf/Nm^3 tr.Rauchgas

(9) $L_o \cdot R_m = L_{theor}$ Nm^3 Luftbedarf/min u. cm Rostlänge.

2) Ergebnis.

Das Ergebnis des Verbrennungsverlaufes für Kohlenstoff und teilweise auch für Wasserstoff ist in den Abb. 54 - 63 aufgetragen. Für die höchste und niedrigste Schichthöhe (5 und 11 cm) sowie für die normal betriebene Schichthöhe von 7 cm ist im Verbrennungsverlauf zwischen vergastem Anteil (CO und H_2) und zwischen verbranntem Anteil (CO_2 und H_2O) unterschieden worden. Für die Schichthöhe 7 cm ist in den Abb. 55 und 56 außerdem der Russgehalt eingezeichnet worden, der etwa 4,75 - 5 % beträgt. Man erkennt den mit grösser werdender Schichthöhe immer stärker werdenden Einfluss des Backens der Kohle (s. auch Luftverteilungskurven), welcher - nachdem anfänglich der Kohlenstoff kräftig vom Roste entbunden worden ist - einen regelrechten tiefen Sattel (Abb. 60 und 61) im Verbrennungsverlauf hervorruft. Während des Backens entgast der Brennstoff langsam weiter. Gegen Ende der Entgasung hört das Backen auf, der Schichtwiderstand verringert sich und durch den stärkeren Luftzutritt erfolgt eine sehr leb-

hafte Steigerung der Verbrennung.

Um den Zusammenhang mit den bisherigen Messergebnissen herzustellen, ist in den Abb. 53 - 62 durch besondere Zeichen angedeutet, an welcher Stelle der Höchstwert und der Kleinstwert der Luftgeschwindigkeit sich auf dem vorderen Rostteil ergeben hatte. Ferner ist der Punkt angegeben, an welchem der Anstieg der Roststabtemperatur beginnt, wo demnach die Zündung bis zum Rost durchgedrungen ist. Man erkennt, dass die Entgasung schon ganz vorne anfängt, ehe eine Verringerung der Luftdurchlässigkeit sich bemerkbar macht. Nach Erreichen des höchsten Schichtwiderstandes, dargestellt durch den Kleinstwert der Luftgeschwindigkeit klingt die Entgasung in allen Fällen rasch ab. Die Verkokung auch der untersten Lagen der Brennstoffschicht ist beendet. Die Durchzündung der Brennstoffschicht muss also vorher vollendet worden sein. Wie man sieht, beginnt auch der Anstieg der Roststabtemperatur stets etwas vor der Stelle des höchsten Schichtwiderstandes.

Vom praktischen Standpunkte aus betrachtet, ist die Kenntnis des natürlichen Zusammenhangs der Vorgänge in besonderer Weise vorteilhaft, weil dann auch Einzel-Messungen zu weitergehenden Schlüssen dienen können. Hat man nämlich in dieser Weise Klarheit gewonnen, so dürfte es nicht schwer sein, schon alleine aus Messungen des Temperaturverlaufs im Rostglied, welche sich ziemlich rasch und mit einfachen Mitteln ausführen lassen, die Hauptabschnitte der Verbrennung, die Zündungs- und Entgasungszone, die Stelle des höchsten Schichtwiderstandes und selbst einiges über den Ausbrand für praktische Zwecke mit genügender Genauigkeit zu erkennen. Der Höchstwert der Roststabtemperatur wird nämlich dort erreicht werden müssen, wo infolge vermehrter Luftzufuhr die Kühlung der Roststäbe gegenüber der Wärmeentwicklung auf dem Rost zu überwiegen beginnt. Durch Vergleiche mit den Abb. 26 und 27 erkennt man, dass dieser Höchstwert der Roststabtemperatur ziemlich in der Mitte der Ausbrandlinie liegt.

Besondere Beachtung verdient noch der ausserordentlich steile Verlauf der Ausbrandlinien. In Abb. 64 ist der Verbrennungsverlauf des Kohlenstoffs noch einmal für die vier untersuchten Schichthöhen zusammengestellt, wobei der Mittelwert der an einem Tage erhaltenen Messergebnisse gebildet wurde, um die Grösse der Rostbelastung eindeutig angeben zu können. Der aus der Stoff-

bilanz sich ergebende Fehler (Vergl.nächsten Abschnitt) ist hierbei ausgeglichen worden. Es zeigt sich hier deutlich, dass die durch das Backen hervorgerufene Verzögerung bei hohen Schichthöhen durch eine noch steilere Ausbrandlinie wieder völlig aufgeholt wird.

Bei derartig steilen Ausbrandlinien, bei welchen die Schichthöhe nicht allmählich geringer wird, kann naturgemäß der Pendelstauer bei natürlichem Zuge nicht sehr wirksam sein. Er wird den unausgebrannten Brennstoff hinten nach kurzer Zeit so stark zusammenschieben, dass die Luft nicht mehr ausreichend hindurchzudringen vermag. Das früher angegebene Mittel, zur besseren Kühlung der Roststäbe hinten kalte Luft in genügender Menge zwischen die beiden Rostbänder gelangen zu lassen, dürfte bei der hier untersuchten Kohle und höherer Brennstoffschicht voraussichtlich nicht einmal ausreichend sein. Wirklich durchgreifende Verbesserung kann dann nur die Anwendung von Zonen bringen, wodurch es möglich ist, vor dem Pendelstauer die erforderliche Pressung einzustellen. Bei natürlichem Zuge wird man hingegen darauf bedacht sein müssen, wie im vorliegenden Falle den Ausbrand vor dem Pendelstauer zu beendigen. An sich bestehen wegen des günstigen Einflusses der steilen Ausbrandlinie auf den Luftüberschuss hierfür ja auch keine Bedenken. Da aber der wechselnde Gehalt an Feinkörnigem in der Kohle die erwähnte veränderte Luftdurchlässigkeit während des plastischen Zustandes bewirkt, so verschiebt sich dementsprechend der Endpunkt der Verbrennung dauernd, sodass man einen Verlust an Rostfläche und damit an Leistung in Kauf nehmen muss, wenn die Glutschicht niemals bis ganz an den Pendelstauer heranwachsen soll. Will man diesen Verlust vermeiden, so muss man gemäß den Versuchen von Rosin, Rammler und Wesemann[28)] das Feinkörnige aus der Kohle aussieben, wie bereits bei der Besprechung des Temperaturverlaufs im Rostglied angegeben wurde.

3) Genauigkeit der Ergebnisse.

Die Genauigkeit der Ergebnisse lässt sich durch Aufstellen einer Bilanz prüfen. Die vom Verbrennungsverlauf für Kohlenstoff bezw. Wasserstoff umgrenzten Flächen müssen maßstäblich umgerechnet dem in der Minute insgesamt verbrannten Kohlenstoff oder Wasserstoff entsprechen. Letztere Werte lassen sich nun aus den

Brennstoffanalysen und dem stündlich verfeuerten Kohlegewicht unter Abzug der Rückstände ermitteln.

Für Kohlenstoff ergibt sich im Mittel ein Wert von 102 %. Berücksichtigt man ferner den Russgehalt, so steigt die Bilanz um weitere 4 - 5 % auf 106 - 107 %.

Der Überwert der Bilanz einer auf Gasanalysen beruhenden Feuerungsuntersuchung findet wie erwähnt seine Erklärung nahezu stets in falschen Mittelwerten der Analysen. Im vorliegenden Falle würde dies demnach besagen, dass trotz der angewandten kurzen Absaugezeit noch Strähnen verschiedener Gasgeschwindigkeit angeschnitten wurden (beobachtete lange blaue Flammen). Dieser Fehler lässt sich durch Höherlegen der Absaugestellen in einfacher Weise vermeiden. Bei der untersuchten Feuerung war das indessen nicht angängig, weil durch das lange Zündgewölbe vorne eine mit der Höhe zunehmende horizontale Gasströmung vorhanden ist, sodass bei höherer Absaugung Gasanalysen und Anemometermessungen nicht mehr in Beziehung zueinander gebracht werden können.

Der ermittelte Fehler kann aber auf den Verlauf der Brennlinie keinen stark fälschenden Einfluss ausüben. Die Ursache falscher Mittelwerte der Gasanalysen ist ja an jeder Messtelle nach der gleichen Richtung hin, wenn auch in stärkerem oder geringerem Maße, vorhanden, sodass bei einem Gesamtfehler der Bilanz um 7 % keine grundlegende Veränderung im Verbrennungsverlauf hervorgerufen werden kann. Hält man sich andererseits die Grösse der in der Literatur[15)] angegebenen Fehler bei Feuerungsuntersuchungen vor Augen, so ist das Ergebnis mi 7 % Überbilanz als durchaus befriedigend zu betrachten; vor allem wenn man die im Verlauf der Auswertung erwähnten Schwierigkeiten beachtet (Temperatureinflüsse auf die Anemometer, ungleichmässige Luftverteilung durch die Konstruktion der Luftregulierung unter dem Rost).

Hinsichtlich der Brennzeit ist überdies das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung völlig einwandfrei.

> Anmerkung: Nach den zuerst zur Auswertung benutzten Brennstoffanalysen, welche,wie die Nachprüfung durch das Schlesische Kohlenforschungsinstitut und das Institut von Dr.-Ing. Rud. Barth, Beuthen-O.S. zeigte,einen zu hohen Gehalt an Wasserstoff aufwiesen, hatte sich für Kohlenstoff ein Überwert von 10 % ergeben, während

die Wasserstoffbilanz einen Fehlbetrag von etwa 10 % enthielt. Da ferner aus den gleichen Brennstoffanalysen ein maximaler CO_2-Gehalt der Rauchgase von 18,2 - 18,3 % errechnet wurde, wogegen die während der Versuche ausgeführten Orsat-Analysen einen für oberschlesische Kohlen normalen Wert von 18,8 - 18,9 % ergeben hatten, war die Veranlassung zur Nachprüfung der Brennstoffanalysen gegeben. Das geprüfte Ergebnis der Brennstoffanalysen klärte einwandfrei die festgestellten Unterschiede auf. Es ergab sich auch für Wasserstoff ein geringer Ueberwert in der Bilanz.

4. Abhängigkeit des Verbrennungsverlaufes von der Zeit.

Die bisherigen Ergebnisse geben guten Aufschluß über das Verhalten bei der Verbrennung in der vorliegenden Feuerung. Es soll indessen im Folgenden versucht werden, ob nicht auch allgemeinere Schlußfolgerungen gezogen werden können.

In Abb. 65 ist noch einmal das Ergebnis von vier Versuchen mit verschiedener Schichthöhe abhängig vom Rostweg wiedergegeben . Es sind dies die unmittelbar aus den Versuchen erhaltenen Ergebnisse und nicht ausgeglichene Mittelwerte mehrerer Messungen wie in Abb. 64. Wie man erkennt, ist aber das Bild nicht sehr von dem der Abb. 64 verschieden. Für die gleichen Versuche ist in Abb. 66 der Verbrennungslauf abhängig von der Zeit aufgetragen. Man entdeckt hierbei, daß die Ausbrandlinien nahezu die gleiche Neigung besitzen, der Ausbrand also zeitlich gleich schnell erfolgt, während Abb. 65 und 64 mit wachsender Schichthöhe einen steileren Verlauf der Ausbrandlinien zeigen. Diese Feststellung findet ihre Erklärung durch den geringeren Vorschub bei größerer Schichthöhe, wodurch die für den Ausbrand erforderliche Zeit auf eine kürzere Roststrecke zusammengeschoben erscheint als bei niedrigerer Schichthöhe. Da die Neigung der Ausbrandlinie den Luftüberschuß maßgebend beeinflußt, so ergibt sich hieraus die allgemein gültige Feststellung, daß die Luftüberschußzahl mit höherer Schichthöhe günstiger werden muß. Wenn die über dem Rostweg aufgetragene Ausbrandlinie auch bei niedrigerer Schichthöhe schon steil verläuft, so kann allerdings der Einfluß auf den Luftüberschuß nicht sehr erheblich sein. Dies ist jedoch sogleich anders, wenn wir es mit einem Brennstoff zu tun haben, dessen Ausbrand träge vor sich geht.

Der Winkel, welcher vorne durch den Anstieg der Brennlinie mit der positiven Richtung der Zeit-Achse gebildet wird, wurde von Werkmeister als Zündwinkel bezeichnet, weil der mehr oder weniger

steile Anstieg der Brennlinie ein Mass für die Durchzündgeschwindigkeit bei gleichartig aufgetragenen Ergebnissen derselben Versuchseinrichtung darstellt. Man erkennt aus Abb.66,daß auch die Zündlinien bei den verschiedenen Schichthöhen nahezu die gleiche Neigung besitzen.

5) Vergleich mit Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten.

Da die Ergebnisse Werkmeisters den Verbrennungsverlauf verschiedener Kohlensorten abhängig von der Zeit wiedergeben, so sei hier der Versuch gemacht, die hier ermittelten Ergebnisse auf gleiche Grundlagen umzurechnen. In Abb. 67 sind in den Schaulinien a und b Versuche von Werkmeister für Ruhr-Gaskohle und 100 mm Schichthöhe dargestellt. Aus den eigenen Versuchen läßt sich durch Interpolation gleichfalls der Verbrennungsverlauf für 100 mm Schichthöhe ermitteln.Als mittlerer Wert aus mehreren Versuchen wurde die Linie c erhalten und in das gleiche Bild eingezeichnet.

Während Versuch a einer Rostleistung von 129 kg/m^2 u.h. und Versuch b einer solchen von 152 kg/m^2 u.h. entspricht, beträgt die Rostbelastung bei dem umgerechneten eigenen Versuch c nur 115 kg/m^2 u.h. Die Rostbelastung ist hierbei auf die gesamte Rostfläche bezogen. Es ist aber notwendig scharf zwischen Rostbelastung und Rostleistung zu unterscheiden, indem man die Rostleistung nur auf den wirksamen Teil der Rostfläche bezieht. Gemäß Abb. 64 ist die Verbrennung schon nach einer Brennlänge von 3,2 - 3,4 m beendigt, während die Gesamt-Brennlänge der Feuerung 4,15 m beträgt. Demnach erhält man für die auf die wirksame Rostfläche bezogene Rostleistung $115 \cdot \frac{4,15}{3,4} = 140$ kg/m^{2}h oder $115 \cdot \frac{4,15}{3,2} = 150$ kg/m^{2}h, je nachdem, wo man den Endpunkt der Verbrennung , welcher den Versuchen a und b entspricht, annehmen will. Hinsichtlich der Rostleistung paßt also der Versuch c gut zu den beiden anderen Versuchen. Betrachtet man die Zusammenstellung, so fällt der langsame Ausbrand der Werkmeister'schen Kurven in ganz besonderer Weise auf. Er wurde von Werkmeister auf das Backen der Gaskohle zurückgeführt und in anschaulicher Weise wurde dies durch Zerkleinern der Koksklumpen mit dem Schürzeug bewiesen, wodurch eine sehr lebhafte Steigerung der Verbrennung erzielt werden konnte (ABB.67 Schaulinie b) Die Löschlinie der eigenen Untersuchung verläuft dagegen ohne künstliche Beeinflussung genau so steil wie die durch Schüren er-

zielte Linie der Untersuchung Werkmeisters. Das Backen der Kohle zeigt sich nur vor Beginn der Löschlinie an einem stark ausgeprägten Sattel im Verbrennungsverlauf, welcher bei natürlichem Zuge auftreten muß, weil der durch das Backen hervorgerufene Schichtwiderstand nicht überwunden werden kann. Die verringerte Luftzufuhr bedingt die Verzögerung der Verbrennung in so starker Weise, daß die Löschlinie erst nach einer um 75 % längeren Brennzeit beginnt als bei Werkmeister, wo man durch veränderte Unterwindpressung die Möglichkeit hatte, auch bei wachsendem Schichtwiderstand genügend Luft durch die Brennstoffschicht hindurchzubringen. Als Endergebnis aber zeigt sich bei der eigenen Untersuchung trotzdem noch eine kürzere Brennzeit selbst als bei dem Versuch Werkmeisters mit Schürung, weil die Verzögerung während der Entgasungs- und Verkokungsperiode durch die äußerst steile Löschlinie wieder ausgeglichen wird.

Mag auch eine solche Umrechnung gewisse Mängel haben so darf man sie doch als Grundlage von Schlußfolgerungen verwenden, wenn derartig erhebliche Unterschiede festgestellt werden, daß selbst bei Annahme eines beträchtlicheren Gesamtfehlers in der Brennzeit der durch die beiderseitige Versuchsgenauigkeit sicher nicht bedingt wird, keine grundsätzliche Änderung des in Abb. 67 wiedergegebenen Bildes eintritt. Wichtig ist das vorliegende Ergebnis einmal wegen der durch kürzere Brennzeit möglichen Leistungssteigerung und zweitens im Hinblick auf den durch eine steile Ausbrandlinie bewirkten höheren Wirkungsgrad der Feuerung (Einfluß auf Luftüberschuß und Verbrennliches in den Rückständen).

Es ist das Nächstliegende, die Ursache für den verschiedenartigen Ausbrand in der Herkunft der Kohle, ihrer Zusammensetzung und ihrer Körnung zu suchen. Bei backender Kohle geht die ursprüngliche Körnung durch die Back und Bläherscheinungen vollständig verloren,[28] sodaß man von der Korngröße aus ohne weiteres keine unmittelbaren Schlüsse bezüglich des Ausbrandes ziehen kann. Wie aber bereits erwähnt, hat größerer Gehalt an Feinkohle stärkeres Backen zur Folge, was sich naturgemäß auch auf die Löschlinie auswirken muß. Da nun die betrachtete Oberschles. Kohle nahezu den zehnfachen Gehalt an kleinerem Korn unter 10 mm

aufweist als die Kohle Werkmeister's, darf man auch annehmen, daß der Staubgehalt gleichfalls größer gewesen ist und demnach müßte man gerade bei dieser Kohle den langsameren Ausbrand erwarten. Die Körnung kann also nicht die Ursache für das festgestellte Brennverhalten gewesen sein. Dagegen soll offen gelassen werden, ob die untersuchte oberschlesische Gaskohle gegenüber der Ruhrkohle Werkmeister's die Neigung hat, an sich weniger zu größeren Stükken zusammenzubacken und demgemäß rascher auszubrennen.

Da die vorliegende Arbeit u.a. bezweckte, Einflüsse der Feuerungsbauart auf den Verbrennungsverlauf kennen zu lernen, so muß hier die Frage berührt werden, ob durch äußere Mittel, deren Gestaltung in der Hand des Feuerungs-Konstrukteurs liegt, das Backen der Kohle und damit der Ausbrand erheblich verändert werden kann.

In Abb. 68 sind zwei von Werkmeister für die gleiche Ruhrgaskohle gefundene Brennlinien wiedergegeben, die deutlich eine solche Veränderung durch äußere Einflüsse zeigen. Brennlinie b ist der schon bekannte Versuch mit Schürung. Ohne Schürung würde der Ausbrand auf den gleichen Endzustand (6,2 % Restkohlenstoff) etwa der punktierten Linie entsprochen haben, da in diesem Falle die überstehenden Flächen gleich sein müssen. Der Restkohlenstoff bei Versuch d beträgt ebenfalls 6 %, die Ausbrandlinie verläuft dagegen wesentlich steiler. In beiden Fällen handelt es sich, wie bemerkt, um die gleiche Kohle, jedoch war die Anfangstemperatur bei Versuch d geringer, und außerdem wurde eine größere Luftmenge durch den Rost geblasen. Während im allgemeinen höhere Luftgeschwindigkeit die Durchzündung fördert, ist dies bei zu hoher Luftgeschwindigkeit nicht mehr der Fall, weil dann die Kühlwirkung der Luft überwiegt. Sowohl die niedrige Anfangstemperatur als auch die höhere Luftgeschwindigkeit bewirken die langsamere Durchzündung bei Versuch d, welche deutlich an dem flacheren Anstieg der Zündlinie und an der Verlagerung der Backzone nach rechts erkennbar ist. Der Versuch c der Abb. 67 zeigt gleichfalls diese Merkmale der langsameren Durchzündung, welche hier durch die milden Einstrahlungsbedingungen des langen Zündgewölbes, also niedrige Anfangstemperatur, einerseits dagegen mäßige Luftgeschwindigkeit andererseits hervorgerufen wird. Die beiden Versuche c und d mit steilen Ausbrand-

linien zeigen demnach eine deutliche Übereinstimmung in dem Vorliegen einer langsam erfolgenden Durchzündung.

Man darf wohl die Vermutung aussprechen, dass es sich hier um mehr als um ein bloß zufälliges Zusammentreffen handelt. Ergebnisse von Schläpfer u.a.[33] weisen jedenfalls nach der gleichen Richtung hin, wenn es angängig ist, jene bei Verkokungsversuchen gewonnenen Erkenntnisse auf den Verkokungsvorgang während der Verbrennung zu übertragen. Es hat sich nämlich bei Verkokungsversuchen gezeigt, daß man die Bläh- und Backwirkung der verschiedensten Kohlensorten durch langsames Erhitzen der Verkokungsproben während des unteren Temperaturbereiches von 20 - 300 °C ganz erheblich einschränken kann. Bei der Verbrennung wird der Temperaturanstieg im Inneren eines jeden Kohlenstückes von der Durchzündgeschwindigkeit abhängen sodass es berechtigt erscheint, die Durchzündzeit parallel neben die Vorwärmzeit der Schläpferschen Verkokungsversuche zu stellen. Längere Durchzündzeiten würden demnach gleichfalls die Back- und Blähfähigkeit der Kohle herabsetzen müssen. Wenn sich nun auch die Durchzündzeit nicht in dem gleichen Maße beliebig verändern läßt, wie dies Schläpfer mit der Vorwärmzeit tun konnte, so lassen sich doch immerhin recht beträchtliche Veränderungen erzielen, wie u.a. auch die Versuche von Tanner[34] zeigen. Die aus Abb. 67 und 68 gezogenen Feststellungen würden sich demnach mit den Ergebnissen Schläpfers sehr gut vereinbaren lassen.

Zu einer endgültigen Bestätigung der hier gezogenen Schlußfolgerungen bedarf es noch weiter planmäßiger Versuche, bei denen unmittelbar die genannten Zusammenhänge im Auge behalten werden müssen. Um aber das in diesem Abschnitt hervortretende Bild abzurunden, seien noch zwei Angaben aus der feuerungstechnischen Literatur in die Betrachtung hineingezogen. Man weiß vom Betriebe mit vorgewärmter Verbrennungsluft, dass bei backender Kohle auf dem ersten Teil des Rostes zu hohe Lufttemperaturen vermieden werden müssen. So soll nach Gumz[27] die Entgasung bei niedrigen Temperaturen stattfinden, damit ein reaktionsfähiger Koks gebildet wird. Diese Ansicht würde also in den Grundzügen durch eine Übertragung der Schläpferschen Ergebnisse auf Verbrennungsvorgänge gleichfalls eine gute Begründung finden können. Anders steht es dagegen mit der von Marcard[35] wiedergegebenen Anschauung, daß gerade rasche Erhitzung der Kohle imstande sei, die Blähwirkung mitunter

erheblich einzuschränken. Rasche Vorschubgeschwindigkeit und kurze und hohe Zündgewölbe sollen sich hiernach förderlich auswirken, indem die geblähten Koksklumpen ("Blumenkohl") dadurch leichter zum Zerfall gebracht werden. Offenbar beruhen die Angaben Marcards auf praktischen Feststellungen bei der Verbrennung auf dem Wanderrost. Das Ergebnis kann demnach wohl kaum in Zweifel gezogen werden. Die Deutung von praktischen Feuerungsversuchen, bei welchen keine Messungen über den Verbrennungsverlauf vorliegen, dürfte aber mitunter nicht leicht sein. Aus Abb. 67 und 68 geht ja schon hervor, wie zu hohe und zu geringe Luftgeschwindigkeit - also offenbar gegenteilige Maßnahmen - in gleichem Sinne auf die Durchzündung verlangsamend einwirken können. Ob demnach bei rascherer Vorschubgeschwindigkeit eine Beschleunigung oder Verzögerung der Durchzündung eintritt, wird man ohne weiteres nicht immer sagen können. Jedenfalls kann hier auf eine solche Möglichkeit, welche den festgestellten Gegensatz auflösen würde, hingewiesen werden.

Es ist aber richtiger, Gegensätze, welche noch nicht einwandfrei und restlos aufgeklärt sind, vorerst bestehen zu lassen. Trotzdem können die Erörterungen dieses Abschnittes mit einem ganz klaren Ergebnis abgeschlossen werden. Es entstand durch den Vergleich der Versuchsergebnisse die Frage, ob das Backen und Blähen der Kohle bei der Verbrennung durch äußere Mittel beeinflußt werden kann. Sämtliche hier wiedergegebenen Ansichten, auch diejenige von Marcard, geben auf diese Frage grundsätzlich eine bejahende Antwort. Mit dieser Feststellung erscheint aber die restlose Klärung der hier ausgesprochenen Vermutungen auch vom Standpunkt des praktischen Feuerungsbaues aus als eine lohnende Aufgabe.

X. Uebersicht über die Ergebnisse bei verschiedener Schichthöhe und Ermittlung der günstigsten Schichthöhe für die vorliegende Feuerung.

Die Veränderung des Luftüberschusses mit der Schichthöhe ist aus der nachfolgenden Aufstellung ersichtlich:

Luftüberschußzahl bei verschiedener Schichthöhe.

Schichthöhe m/m	50	70	90	108/110
Luftüberschußzahl	1,93	1,71	1,67	1,66

Der Einfluß ist nur bei der niedrigsten Schütthöhe beträchtlich. Schichthöhen unter 70 m/m erfordern also einen erheblich höhe - ren Luftüberschuß. Es ist anzunehmen, daß der hier festgestellte Grenzwert der Schichthöhe für die Verfeuerung mit erträglichem Luftüberschuß von der Körnung der Kohle abhängig ist.

Der in Abschnitt IX, 4, allgemeingültig festgestellte gün- stige Einfluß der höheren Schichthöhe auf den Luftüberschuß, wel- cher durch den steileren Verlauf der Löschlinie bedingt wird, tritt hier dagegen nur schwach in Erscheinung, weil die Lösch - linien an sich sehr steil verlaufen, wie an a.O. bereits er - wähnt.

Verbrennliches in den Herdrückständen bei verschiedener Schichthöhe.

Die folgende Aufstellung gibt ein Bild über die Güte des Aus - brandes bei verschiedenen Schichthöhen.

Schicht- höhe	Rostdurchfall				Schlacke			
	Gew. kg/ std.	%	Verbrennliches kg/ std.	% vom Kohlen- verbr.	Gew. kg/ std.	%	Verbrennliches kg/ std.	% vom Kohleverbrauch
50	12,7	43,6	5,54	0,89	31	24,95	7,74	1,24
70	12,89	33,67	4,34	0,696	31,1	15,8	4,91	0,79
90	8,89	32,55	2,89	0,455	27,5	15,03	4,13	0,65
108/110	6,25	21,98	1,37	0,233	36,75	8,25	3,03	0,514

Kontrolle des Aschegehaltes

Aschegehalt % des Brenn- stoffes	Ascnegehalt in den Rückständen in % des Brennst.	Differenz = Flugasche in % des Brennst.
7,09	4,9	2,19
6,82	5,58	1,24
5,7	4,62	1,07
6,53	6,54	0

Die Tabellen zeigen deutlich, daß einmal der Rostdurchfall abso- lut mit wachsender Schichthöhe abnimmt und zweitens, daß der An- teil des Verbrennlichen im Rostdurchfall sowohl als in der Schlacke bei größerer Schichthöhe geringer wird. Das Ergebnis ist einleuchtend und bedarf keiner näheren Begründung. Die Güte des

Ausbrandes wird eindeutig mit wachsender Schichthöhe besser. Die Tafel über die Kontrolle des Aschegehaltes zeigt ferner, daß auch die Flugasche mit wachsender Schichthöhe abnimmt. Dieses letzte Ergebnis darf man aber wohl nicht verallgemeinern und auch für Unterwindwanderroste ohne weiteres als gültig ansehen, weil die Größe der Luftgeschwindigkeit hier maßgeblich sein wird. (Abb.51)

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der einzelnen Unter - suchungen, daß höhere Schichthöhen durchweg mit besserem Erfolge verfeuert werden. Die Anstrengung des Rostmaterials ist aber dabei größer (Roststabtemperaturen). Auch findet die Schichthöhe nach oben hin ihre Grenze durch den wachsenden Widerstand des Brennstoffbettes; diese Grenze ist aber bei jeder Feuerung eine andere und durch größte Zugstärke sowie die Art der Zuführung der Verbrennungsluft (natürlicher Zug - Unterwindzoneneinteilung) bedingt. Als günstigste Schichthöhe für die vorliegend unter - suchte Feuerung in ihrer gegenwärtigen Konstruktion muß aus praktischen Gründen wegen des Verschleißes der Roststäbe und eines möglichst gleichmäßigen Betriebes (veränderliches Backen der Kohle wirkt sich bei höherer Schütthöhe in stärkerem Maße stö - rend aus) die Schichthöhe von 70 m/m angesehen werden.

XI. Weitere Messungen und Ergebnisse bei der günstigsten Schichthöhe von 70 m/m.

1. Temperaturverlauf im Feuerraum.

Wie bereits erwähnt, wurden die Gastemperaturen nur bei der Schichthöhe von 70 m/m ermittelt, da wegen der Möglichkeit etwaiger Nachverbrennungen eine weitgehende wissenschaftliche Auswer - tung doch nicht angängig erscheint. In Verbindung mit den ermittelten Schaulinien des Verbrennungsverlaufes ergibt sich aber immerhin eine recht anschauliche Erklärung für den festgestellten Temperaturverlauf, besonders wenn man sich vor Augen hält, daß die erhaltenen Werte der Gaszusammenstellung bei der Möglichkeit etwaiger Nachverbrennungen Mindestgehalte für die unver - brannten Gase darstellen.

Die Gastemperaturen wurden in 10 cm Höhe über der Brennstoffschicht gemessen, was bei der Betrachtung der Ergebnisse in Abb.69 zu beachten ist. Trotz des geringen Abstandes des Pyrometers von

der Brennstoffschicht ist eine Verfälschung des Ergebnisses durch unmittelbare Strahlung vom Rost aus kaum anzunehmen. Dies zeigt schon der eigenartige Verlauf der gemessenen Temperaturen, denn die Oberfläche der Brennstoffschicht dürfte kaum an den verschiedenen Stellen derartig verschieden sein. Die gute Brauchbarkeit des Absaugepyrometers nach Schmidt [30] dürfte hierdurch bestätigt werden.

Besonders auffällig ist die auftretende Temperaturspitze in der Gegend der Meßstellen 6 und 7, wo Temperaturen festgestellt wurden, die an 1700 °C heranreichen und somit der Haltbarkeit des Platins nahekommen. Diese Temperaturspitze befindet sich nicht dort, wo ein hoher Gehalt unverbrannter Gase festgestellt wurde sondern an der Stelle, wo gemäß den Schaulinien des Verbrennungsverlaufes Abb. 56 und 57 offenbar die größte Wärmeentwicklung auf dem Rost vermutet werden kann, da hier der vollkommen zu CO_2 verbrannte Kohlenstoff ein ausgesprochenes Maximum besitzt. Die hohe Temperatur würde sich dann aus den Abstrahlungsverhältnissen erklären. Auf den ersten Blick erscheint es zwar so, als ob die Abstrahlungsverhältnisse gerade an dieser Stelle besonders günstig sind, weil die abschirmende Wirkung des Zündgewölbes nicht mehr vorhanden ist, sodaß die Strahlung unmittelbar an die Wasserrohre erfolgen könnte. Dies ist aber nicht der Fall, denn die besonders an den Meßstellen 4 und 5 entwickelten unverbrannten Gase können erst weiter oben im Feuerraum durch Mischung mit der heißen Überschußluft des Rostendes verbrennen und entwickeln daher an jener Stelle einen Kern hoher Temperatur. Der hohe Rußgehalt, der gleichfalls erst hier zur Verbrennung gelangen kann, verstärkt die Wirkung, welche zur Bildung eines ausgesprochenen Strahlungsschirmes im Feuerraum führt. Durch den Rußgehalt wird nämlich die Strahlung viermal so stark wie die der nichtleuchtenden Flamme, [31] sie kommt demnach nahe an die Verhältnisse beim schwarzen Körper heran.

Die vorstehenden Ausführungen werden durch die Abb. 70 veranschaulicht, welche aus den Schaulinien des Verbrennungsverlaufes bei 70 m/m Schichthöhe ermittelt wurde und die auf dem Rost entwickelte Wärme als auch die wegen Luftmangels noch unentwickelte Wärme wiedergibt. Entsprechend den eingezeichneten Pfeilen kommt

letztere erst weiter oben im Feuerraum hinter dem Zündgewölbe zur Auswirkung. Letzten Endes wird dieser Wärmestau durch das Zündgewölbe hervorgerufen. Das Bestrahlungsdiagramm nach Barth 25) veranschaulicht diesen Einfluß des Zündgewölbes in deutlicher Weise Abb. 71. Die Wärme, die durch den Verlust an Strahlungsheizfläche vorne nicht übertragen werden kann, muß später übertragen werden und verursacht den Wärmestau.

Da das Zündgewölbe für eine gute Mischung der unverbrannten Gase mit dem Luftüberschuß des Rostendes andererseits ein sehr gutes Mittel darstellt, so bedarf die Festlegung der Zündgewölbelänge besonderer praktischer Erfahrung. Vor allem bei stark rußenden Kohlen ergeben die langen Zündgewölbe sehr hohe Temperaturen. Wirklich gefährlich ist aber die hohe Temperatur an sich noch 36) nicht. Sie wird es erst bei gleichzeitig vorhandenem Luftmangel, weil in gemischter Atmosphäre die Schlackenschmelzpunkte durch Bildung leicht schmelzbarer zweiwertiger Eisenverbindungen stark erniedrigt werden können. Die dünnflüssige Schlacke greift dann das Mauerwerk sehr stark an. Nach Möglichkeit sollte man deshalb danach streben,das Gebiet des Luftmangels zu verringern.

Im vorliegenden Falle ist der Angriff der Schlacke auf das Mauerwerk sehr stark, sodass eine häufige kostspielige Erneuerung desselben erforderlich ist.

2) Wirkliche und theoretisch erforderliche Luftverteilung.

Im Zusammenhang mit den Betrachtungen des vorigen Abschnittes ist es wertvoll, sich ein Bild von der wirklichen und der theoretisch erforderlichen Luftverteilung zu machen. Für die betrachtete Schichthöhe von 70 mm werden die Verhältnisse durch die Abb. 72 wiedergegeben

Man erkennt deutlich, dass es bei besserer Absperrung des hinteren Rostteiles auch bei natürlichem Zuge gelingen muss, die Luftüberschusszahl weitgehend etwa von 1,7 auf 1,3 (entsprechend 14 - 15 % CO_2) zu verringern. Diese Maßnahme würde gleichzeitig auch noch andere Vorteile haben.

Da durch die Absperrung des hinteren Rostteiles der Zug vorne unter dem Gewölbe steigen würde, so hätte dies eine Einschränkung des Luftmangelgebietes zur Folge. Ganz vermeiden lassen wird sich der Luftmangel indessen nicht, da dies selbst bei Zonenunterwind ohne An-

wendung von Zweitluft nicht erreicht werden kann. Immerhin wird sich aber die Gaszusammensetzung so weit ändern, dass ein günstiger Einfluss auf den Schlackenschmelzpunkt erwartet werden kann.

Es ist ferner auch noch eine günstige Wirkung auf die Roststabtemperatur wahrscheinlich. Gemäß Abb. 26 ruft die hinten durch den Rost tretende Luft nur eine Rückkühlung der Roststäbe hervor. Würde man dagegen die Luft durch bessere Absperrung zwingen, mehr vorne durch den Rost zu treten, so ergäbe dies an sich eine beträchtliche Herabsetzung des Höchstwertes der Roststabtemperatur, weil nach Schulte und Tanner[28)] die höhere Luftgeschwindigkeit neben der besseren Kühlung auch unmittelbar den Wärmeübergang an die Rostoberfläche durch Granulieren der Schlakke verringert.

XII. Zusammenfassung

Es wurden Messgeräte und ein Verfahren entwickelt, welches den Verbrennungsverlauf auf dem betriebsmäßigen Wanderrost zu untersuchen gestattet.

Als Versuchsgeräte dienten wassergekühlte Gasabsaugerohre zur Entnahme von Feuergasproben, zwei Anemometer zur Messung der Luftverteilung und verschiedene Temperaturmessgeräte. Die praktischen Erfahrungen bis zur völligen Brauchbarkeit der Geräte wurden mitgeteilt und die Eichung der Instrumente angegeben. Der Temperatureinfluss der warmen Luft auf die Anzeige der Anemometer konnte durch ein rechnerisches Verfahren ermittelt werden. Da die Anemometer nur zur Messung der Luftverteilung dienten, während die Gesamtluftmenge aus den Abgasanalysen und der Kohlemessung sich ergab, ist der Fehler, welcher bei der Vernachlässigung des Temperatureinflusses auf die Anzeige sich einstellen würde, nicht sehr gross. Es muss aber trotzdem unbedingt gleichzeitig mit der Anemometermessung stets auch die Lufttemperatur an der Messstelle festgestellt werden, da die gemessenen Luftgeschwindigkeiten auf gleiche Lufttemperatur bezogen werden müssen, wenn man Aufschluss über die Luftmengenverteilung haben will.

Es wurden für vier verschiedene Schichthöhen zwischen 50 und 110 mm der Verlauf der Roststabtemperaturen, der Lufttemperaturen und der Luftmengenverteilung unter dem Rost sowie die Zusammen-

setzung der Feuergase in etwa 8 cm Höhe über der Brennstoffschicht bei Verfeuerung oberschlesischer Kohle der Hedwigswunsch- und Ludwigsglück-Grube festgestellt.

Durch die Auswertung der Messungen liess sich die Umwandlung einer ganz bestimmten Kohlenmenge in den gasförmigen Zustand fortschreitend verfolgen. Besonderer Wert wurde auf den Zusammenhang der Messergebnisse miteinander gelegt, wodurch sich ein sehr guter Einblick in die Vorgänge bei der Verbrennung ergab. Die betrachtete Kohlenmenge wurde im vorliegenden Falle wahllos aus der Beschickung herausgegriffen, es besteht aber keine Schwierigkeit, vorher ausgewählte und sortierte Kohle in kleinen Mengen vor dem Schüttrichter auf den Rost zu bringen und nach der Förderung unter dem Schüttrichter hindurch in den Feuerraum hinein dort fortlaufend zu untersuchen.

Das Verfahren ergab im Durchschnitt einen positiven Fehler von + 7 % in der Bilanz. Dieser Fehler ist aber kein Mangel des Verfahrens selbst, sondern im wesentlichen durch besondere konstruktive Einzelheiten der Feuerung (Zündgewölbe, ungleichmäßige Luftverteilung hinten durch die Luftregulierung) bedingt. Zur wissenschaftlichen Untersuchung verschiedenster Kohlensorten empfiehlt sich deshalb eine Feuerung, bei welcher die erwähnten störenden Einflüsse nicht vorhanden sind. Trotz des genannten Fehlers wird der Verbrennungsverlauf als solcher mit grosser Annäherung richtig wiedergegeben und nur der Maßstab ist um ca 7 % zu gross. Besonders erwähnt werden muss, dass dieser Fehler keinen Einfluss auf die Brennzeit hat.

Die Ergebnisse gelten naturgemäß in erster Linie für die untersuchte Feuerung, welche im besonderen durch das lange Zündgewölbe und durch die geringen Zugverhältnisse am Rost gekennzeichnet ist. Darüber hinaus wurden aber auch allgemeingültige Erkenntnisse erhalten.

Der geringe Zug hat starken Luftmangel im Gebiet der Entgasungszone zur Folge. Hier wurden insgesamt bis zu 5 % des Kohlenstoffes im aufgegebenen Brennstoff als Russ festgestellt, welcher die Gasentnahmeleitungen von weniger als 10 mm lichter Weite nach kurzer Zeit völlig verstopfte. Infolgedessen war es nicht möglich, Nachverbrennungen, welche die wahre Gaszusammensetzung ändern, mit Sicherheit zu vermeiden.

Im einzelnen wurden folgende Ergebnisse festgestellt:

Höhere Schichthöhen ergeben höhere Roststabtemperaturen. Die Lufttemperatur unter dem oberen Rostband ist am hinteren Rostende recht beträchtlich. Die Lufterwärmung geschieht in erster Linie durch die Rückkühlung des unteren Rostbandes und hängt demnach von der Vorschubgeschwindigkeit des Wanderrostes ab. Es wurde angeregt, den Rost selbst als Luftvorwärmer zu benutzen, indem man die Rückkühlung dort vornimmt, wo sie zweckmäßig erscheint.

Mit wachsender Schichthöhe macht sich der Widerstand des Brennstoffbettes in der Entgasungszone immer mehr fühlbar, sodass die durchtretende Luftmenge bei natürlichem Zuge hier stark verringert wird. Dies hat auch ein Zurückgehen der Verbrennung zur Folge, welche an der Sattelbildung in den Schaulinien des Verbrennungsverlaufes deutlich wird.

Die Ausbrandlinie wird bei höherer Schichthöhe steiler, obwohl der Ausbrand bai allen Schichthöhen mit gleicher Geschwindigkeit vor sich geht. Erklärt wird dies durch den geringeren Vorschub bei grösserer Schichthöhe, wodurch die Ausbrandzeit auf eine kürzere Roststrecke beschränkt wird.

Ein Vergleich der Versuche bei verschiedenen Schichthöhen fiel vom Standpunkt des Feuerungswirkungsgrades eindeutig zu Gunsten höherer Schichthöhen aus. Da aber die Anstrengung des Roststabmaterials bei höherer Brennstoffschicht stärker wird, so muß als günstigste Schichthöhe für die vorliegende Feuerung die Schichthöhe von 70 mm angesehen werden.

Als besonders wichtiges Ergebnis zeigt sich eine aussergewöhnlich steile Ausbrandlinie der untersuchten oberschles. Gaskohle. So wünschenswert eine steile Ausbrandlinie auch vom Standpunkte des Luftüberschusses erscheint, so treten bei natürlichem Zuge doch Schwierigkeiten auf, weil das Staupendel nicht seinem Zweck entsprechend ausgenutzt werden kann. Der Ausbrand muß vor dem Staupendel beendet sein, weil sonst leicht ein dicker Glutberg vor demselben liegen bleibt. Will man dies gänzlich vermeiden, so ergibt sich ein Verlust an Rostfläche. Durch Aussieben des Feinkörnigen in der Kohle kann indessen der Verlust an Rostfläche eingeschränkt werden.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit Versuchen von Werk-

meister führt zu der Frage, ob das Backen der Kohle und damit der Ausbrand durch äußere Einflüsse (Schnelligkeit der Erhitzung) beeinflusst werden kann. Diese Frage konnte restlos bejaht werden. Aus den vorliegenden Versuchen erscheint es ferner wahrscheinlich, dass langsame Durchzündung der Kohle das Backen und Blähen vermindert.

Die Feuergastemperatur wurde nur für eine Schichthöhe in etwa 10 cm Höhe über der Brennstoffschicht ermittelt. Da die Feststellung der wahren Gaszusammensetzung wegen der Verstopfungen durch den hohen Russgehalt nicht möglich war, so war hierdurch die zusammenhängende Auswertung von Gastemperaturen und Gaszusammensetzung eingeschränkt. Im anderen Falle hätte sich die an jeder Stelle abgestrahlte Wärmemenge als Differenz der fühlbaren Wärme im Gas (Temperatur) und der aus der Zusammensetzung erhaltenen entwickelten Wärme bestimmen lassen. Immerhin konnte doch ein recht anschaulicher Zusammenhang zwischen Temperaturmessung und Verbrennungsverlauf festgestellt werden.

Zahlentafel 1

Übersicht über die Versuchswerte

Datum des Versuchs	Barom-stand m/m Hg bei 0°C	Kohlen-ver-brauch kg/h	Rost durch-fall kg/h	Schlak-ke kg/h	Versuch Nr	Ver-suchs-dauer min.	Rost-be-lastung kg/m²h	Dampf er-zeugung to/h	Gang Nr.	Schicht-höhe cm	Luft-sch. Stellg. Nr	Anemometer Nr. 19172 Messstelle	Anemometer Nr. 19618 Messstelle	Abgas-tempe-ratur °C	Zug vor Eko m/m H_2O	Zug Kessel ende m/m H_2O	Zug über Rost a m/m H_2O	Zug über Rost b m/m H_2O	Zug über Rost c m/m H_2O	Zug über Rost d m/m H_2O	Zug unt. Rost e m/m H_2O	Zug unt. Rost f m/m H_2O	Bemerkung
13.4.32.	755,2	615	12,7	31	1	20	~115	4,04	6	5	0	IV	V	330	7,4	16,0	1,94	2,46	2,61	2,45	0,63	0,8	
					2	20	119	4,18	6	5,3	0	"	V	331	7,6	16,4	2,1	2,55	2,72	2,53	0,62	0,78	
16.4.32.	74,2	622	12,89	31,1	3	25	117,6	4,4	5	7	0	"	III	330	7,2	16,2	1,98	2,53				0,7	Zugmeßstellen c-e durch Schlacke verstopft
					4	25	117,6	4,5	5	7	0	"	III	330	7,3	16,6	1,94	2,58	2,73	2,56		0,7	
20.4.32.	747,5	636	8,9	27,5	5	30	120	4,53	4	9	2	"	V	333	7,5	16,0	2,22	2,9	3,04	2,84	0,5	0,66	
					6	30	120	4,47	4	9	2	"	V	333	7,7	16,2	2,27	3,01	3,18	3,0	0,52	0,66	
11.5.32.	748,9	588	6,25	36,75	7	35	111	3,85	3	11/10,8	0	"	V	326	6,1	13,1	1,86	2,58	2,6	2,52		0,51	
					8	35	111	3,85	3	11/10,8	0	"	V	328	6,5	14,1	1,87	2,72	2,75	2,57		0,58	
18.3.32.	748,2	660	17,9	35,8	9	25	125	4,53	5	7	1	"	V	330	8,9	17,25	2,34	2,92	-	2,94		0,77	
					10	25	125	4,5	5	7	1	"	V	331	9	18	2,42	2,96	-	2,98		0,79	
8.4.32.	737,2	676	10,6	33,4	11	30	128	4,66	4	9	1	"	V	332	7-9,5	16-18	1,6-2,2	1,8-2,4	2,2-2,8	2,2-2,8		0,62-0,7	Infolge Sturm stark schwankender Zug

Zahlentafel 2

Unverbrennliches in den Rückständen.

Nr. des Vesuches	1	2	3	4	5	6	7	8
Verbrennliches im Rostdurchfall %	43,6		33,67		32,55		21,98	
" - in der Schlacke %	24,95		15,8		15,03		8,25	

Ergebnis der Orsatanalysen.

Zahlentafel 3

Datum des Versuches	13.4.32.			13.4.32.			16.4.32.			16.4.32.			20.4.32.			20.4.32.		
Nr. " "	1			2			3			4			5			6		
Schichthöhe cm	5			5,3			7			7			9			9		
	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%
Mittelwert der Analysen hinter Überhitzer	9,14 (9,25)	10,8 (10,72)	~0,1	9,4 (9,48)	10,47 (10,43)	~0,1	10,46 (10,2)	9,4 (9,72)	~0,1	10,67 (10,66)	9,3 9,28	~0,1	10,9 (10,54)	8,96 9,46	~0,1	10,9 (11,36)	8,9 (8,53)	~0,1
Mittelwert der Analysen vor Economiser	– (10,0)	– (9,9)	–	– (10,6)	– (9,3)	–	10,4 (10,4)	9,0 (9,0)	–	– (11,47)	– (7,97)	–	11,9 (10,54)	8,76 (9,2)	–	11,3 (11,69)	8,4 (7,82)	–
Mittelwert der Analysen hinter Economiser	9,4 (9,7)	10,3 (10,03)	–	9,47 (10)	10,3 (9,74)	–	10,37 (10,36)	9,2 (9,18)	–	10,68 (10,64)	8,88 (8,94)	–	10,6 (10,21)	8,96 (9,46)	–	10,9 (11,55)	8,7 (8,13)	–
Gesamt Mittelwert	9,3 (9,65)	10,5 (10,22)	–	9,4 (10)	10,4 (9,83)	–	10,4 (10,32)	9,3 (9,3)	–	10,67 (10,87)	9,09 (8,58)	–	11,0 (10,43)	8,8 (9,37)	–	11,03 (11,54)	8,66 (8,16)	–

Datum des Versuches	11.5.32.			11.5.32.			18.3.32.			18.3.32			8.4.32.		
Nr. " "	7			8			9			10			11		
Schichthöhe cm	11/10,8			11/10,8			7			7			9		
	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%	CO_2%	O_2%	CO%
Mittelwert der Analysen hinter Überhitzer	11,9	8,07	~0,1	11,08	8,9	~0,1	11,0 (11,05)	8,5 (8,5)	~0,1	10,2 (10,2)	9,4 (9,4)	~0,1	12,25	7,2	0,2
Mittelwert der Analysen vor Economiser	–	–	–	–	–	–	– (10,53)	– (8,2)	–	10,4 10,4	8,9 (8,4)	–	12,5	6,8	–
Mittelwert der Analysen hinter Economiser	11,1	7,9	–	11,3	8,34	–	10,5 (10,46)	9,1 (9,1)	–	(10,4) (10,4)	9,2 (9,16)	–	12,2	7,2	–
Gesamt Mittelwert	11,5	7,98	–	11,2	8,6	–	10,75 (10,68)	8,8 8,6	–	10,33 (10,33)	9,1 (9,0)	–	12,3	7,1	–

Die (—) Werte sind Mittelwerte über den ganzen Versuch. Die übrigen Werte dagegen Mittelwerte über die 2. Versuchshälfte.

Zahlentafel 4

Zusammensetzung der Feuergase.

Versuch vom 13.4.32. Schichthöhe 5 cm. Rostbelastung 117,5 kg/m²h

Versuch 1 (* + 10 cm)

Absaugestelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1*	6,2	–	12,2	–	–	–	81,6
2	11,2	–	5,2	0,2	–	–	83,4
3	11,8	–	0	7,1	3,1	–	78,0
4	7,2	–	0	15,8	8,5	0,2	68,3
5	18,1	–	0,1	3,4	0,4	–	78,0
6	20	–	0,7	0,2	–	–	79,1
7	17,8	–	2,9	–	–	–	79,3
8	8,2	–	12,7	–	–	–	79,1
9	3,4	–	17,5	–	–	–	79,1
10	2,4	–	18,5	–	–	–	79,1
11	1,1	–	19,8	–	–	–	79,1

Versuch 2 (Schichthöhe 5,3 cm)

Absaugestelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1	–	–	20,6	–	–	–	79,4
2	10,6	–	6,3	–	–	–	83,1
3	11,5	–	–	7,1	3,2	–	78,2
4	7,6	–	0,1	14,3	9,7	0,3	68
5	11,5	–	–	11,7	2,6	–	74,2
6	19,0	–	0,3	2,2	–	–	78,5
7	10,6	–	10,1	–	–	–	79,3
8	7,0	–	13,9	–	–	–	79,1
9	2,5	–	18,4	–	–	–	79,1
10	1,4	–	19,4	–	–	–	79,2
11	0,5	–	20,4	–	–	–	79,1

Versuch vom 16.4.32. Schichthöhe 7 cm Rostbelastung 117,6 kg/m²h

Versuch 3 (* + 4 cm)

Absaugestelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1*	0	–	20,9	–	–	–	79,1
2	13,2	–	3,4	–	–	–	83,4
3	13,3	–	–	5,1	2,0	–	79,6
4	8,1	–	–	14,8	8,0	–	69,1
5	8,5	–	0,1	16,1	5,8	0,1	69,4
6	15,2	–	–	9,1	0,1	–	75,6
7	17,7	–	2,7	–	–	–	79,6
8	11,7	–	9,2	–	–	–	79,1
9	4,6	–	16,3	–	–	–	79,1
10	1,1	–	19,8	–	–	–	79,1
11	0,4	–	20,5	–	–	–	79,1

Versuch 4 (* + 6 cm)

Absaugestelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1*	0	–	20,9	–	–	–	79,1
2	12,6	–	3,2	0,2	–	–	84,0
3	9,2	–	–	11,5	6,4	–	72,9
4	6,9	–	–	16,8	10,5	0,3	65,5
5	9,3	–	–	16,4	3,6	–	70,7
6	14,2	–	0,5	9,8	0,1	–	75,4
7	18	–	0,4	3,6	–	–	78
8	11,4	–	9,5	–	–	–	79,1
9	4,3	–	16,6	–	–	–	79,1
10	1,1	–	19,8	–	–	–	79,1
11	0,3	–	20,6	–	–	–	79,1

Versuch vom 20.4.32. Schichthöhe 9 cm Rostbelastung 120 kg/m²h

Versuch 5

Absaugestelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1	0,2	–	20,4	–	–	–	79,4
2	9,8	–	7,4	–	–	–	82,8
3	8,5	–	0,1	13,6	7,6	0,2	70
4	7,0	–	–	17,7	11,5	0,3	63,5
5	6,5	–	–	18,3	13,3	0,6	61,3
6	10,8	–	–	15,7	1,1	–	72,4
7	14,5	–	–	10,2	–	–	75,3
8	19,4	–	1,0	0,5	–	–	79,1
9	18,6	–	1,5	1,2	–	–	78,7
10	2	–	18,8	–	–	–	79,2
11	1,6	–	19,2	–	–	–	79,2

Versuch 6 (* + 5 cm)

Absaugestelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1*	0,2	–	20,7	–	–	–	79,1
2	14,4	–	0,8	0,7	–	–	84,1
3	10,1	–	–	10,3	4,6	–	75
4	7,0	–	–	17,3	9,7	–	66
5	6,2	–	–	18,5	15	0,3	60
6	–	Flasche	undicht			–	–
7		"	"				
8	19,7	–	1,0	0,2	–	–	79,1
9	5,2	–	15,5	0,2	–	–	79,1
10	1,3	–	19,6	–	–	–	79,1
11	0,4		20,5	–	–	–	79,1

Zahlentafel 4
(Fortsetzung)

Versuch vom 11.5.32. Schichthöhe 11cm, Rostbelastung 111 kg/m²h

Versuch 7

Absauge Stelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1½	5		14,6	–	–	–	80,7
2	14,8		0,6	1,0	–	–	83,6
3	9,4		0,2	12,2	6,1	0,2	71,9
4	7,5		–	16,2	10,5	0,3	65,5
5	9,8		–	14,7	5,3	0,3	69,9
6	12,1		–	13,7	–	0,2	74,0
7	12,6		–	13,1	–	–	74,3
8	19,4		1,2	0,2	–	–	79,2
9	5,6		15,1	0,3	–	–	79
10	0,7		20,1	–	–	–	79
11			20,8	–	–	–	79

Versuch 8

Absauge Stelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1½	4,2		14,8	–	–	–	81
2	13,8		1,2	1,4	–	–	83,6
3	10,4		–	11,6	5,2	0,1	72,7
4	7,1		–	17,5	12,8	0,5	62,1
5	8,5		–	15,4	9,1	0,3	66,7
6	9,6		–	18,4	0,8	–	71,2
7	12,2		0,1	14,4	–	–	73,3
8	14,7		5,8	0,4	–	–	79,1
9	4,6		15,8	0,3	–	–	79
10	0,4		20,4	–	–	–	79,2
11	–		20,8	–	–	–	79,2

Versuch vom 18.3.32. Schichthöhe 7cm, Rostbelastung 125 kg/m²h

Versuch 9

Absauge Stelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1+6,5	–		20,8	0,2	–	–	79
2	9,8		5,6	1,7	0,8	0,2	81,9
3	10,3		0,9	10,2	5,2	0,2	73,2
4	7,5		0,1	16,1	8,2	0,2	67,9
5	6,2		3,1	15,0	7,8	0,3	67,7
6	11,5		0,2	12,9	2,9	–	72,5
7	9,1		11,1	2,4	–	–	77,4
8	10,6		10,2	–	–	–	79,2
9	4,7		16,1	0,3	–	–	78,9
10	2,2		18,5	0,2	–	–	79,1
11	1,2		19,6	–	–	–	79,2

Versuch 10

Absauge Stelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1	–		20,5	0,2	–	–	–
2	6		12,4	0,2	–	–	–
3	9,4		0,2	10,2	6,1	0,3	–
4	7,3		4,8	6,6	4,0	0,2	–
5							
6	Absaugerohr durch Russ verstopft,						
7	obwohl das Rohr eine lichte Weite						
8	von 10 m/m besitzt.						
9							
10							
11							

Versuch vom 8.4.32. Schichthöhe 9cm, Rostbelastung 128 kg/m²h

Versuch 11

Absauge Stelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1+8cm	1,3		19,1	–	–	–	79,6
2	12,2		3,0	0,4	0,3	–	84,1
3	11		–	8,4	3,4	–	77,2
4	7,5		0,2	15,7	8,6	–	68
5	6,8		–	17,0	12,9	–	63,3
6	10,8		–	15,8	1,6	–	71,8
7	11,7		–	15	0,5	–	72,8
8	18,1		0,9	3,1	–	–	77,9
9	4,4		16,6	–	–	–	79
10	1,6		19,2	–	–	–	79,1
11	0,3		20,6	–	–	–	79,1

Versuch 12 Wegen versagen des Anemometers an Messstelle IV nicht ausgewertet.

Absauge Stelle Nr.	CO_2 %	C_nH_m %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %
1	1,7		18,5	–	–	–	79,8
2	12,4		4,6	–	–	-	83
3	11,5		–	8,9	2,8	–	76,8
4	8,2		–	14,1	7,8	0,1	69,8
5	6,3		0,1	18,8	15,1	0,4	59,3
6	8,6		0,1	17,5	3,8	–	70,0
7		undicht					
8	15,6	–	0,2	8,5	–	–	75,7
9	12,2		8,5	–	–	–	79,3
10	2,4		18,4	–	–	–	79,2
11	0,6		20,3	–	–	–	79,1

Kennzeichnung der untersuchten Kohle.

Zahlentafel 5

Hedwigswunsch- u. Ludwigsglückgrube, Borsigwerk/O.S.

	C %	H %	O %	N %	S %	Asche %	Wasser %	Flüchtig. Bestandteile bezogen auf tr. Kohle %	Ermittl. d. Kohlen- u. Wasserstoffgeh. der trock. Kohle	Körnung unter 7 m/m %	7-10 m/m %	10-15 m/m %	15-25 m/m %
Kohlenprobe I 13.4.32.	71,6	4,96	8,73	1,02	0,98	7,09	5,62	37,1	durch: Schles. Kohle-	–	–	–	–
" " II 16.4.32.	72,7	5,01	8,78	1,04	0,99	6,82	4,66	37,42	forschungsinstitut	11,3	8,6	36,9	43,2
" " III 20.4.32.	73,2	5,05	8,89	1,04	0,99	5,7	5,23	37,85	der Kaiser-Wilhelm Ges.	4,6	7,6	40,1	47,7
" " IV 11.5.32.	72,6	4,21	9,63	1,05	0,99	6,53	4,99	35,91	i. a. v. Dr. Ing. R. Barth Beuthen	4,5	5,8	30,7	59

Rußgehaltbestimmungen der Feuergase (Schichthöhe 7 cm)

Zahlentafel 6.

Absaugeort Nr.	Ermitteltes Rußgewicht gr.	Rauchgasmenge lit. (0° 760)	Rußgehalt a gr./Nm³	Rußgehalt b gr./Nm³	Rußgehalt a + b gr./Nm³	Bemerkungen
2	0,041	36,8	1,125	2,5	3,625	
3	0,0911	24,02	3,79	8,42	12,21	
4	0,1115	24,48	4,52	10,05	14,57	
5	0,0926	22,85	4,05	9,0	13,05	
6	0,022	29,65	0,749	1,665	2,41	teilweise Flugasche

Durch Auswaschen des Rohres wurden 0,797 gr. Ruß ermittelt. Dieser wurde als Rußgehalt „b" anteilig verteilt.

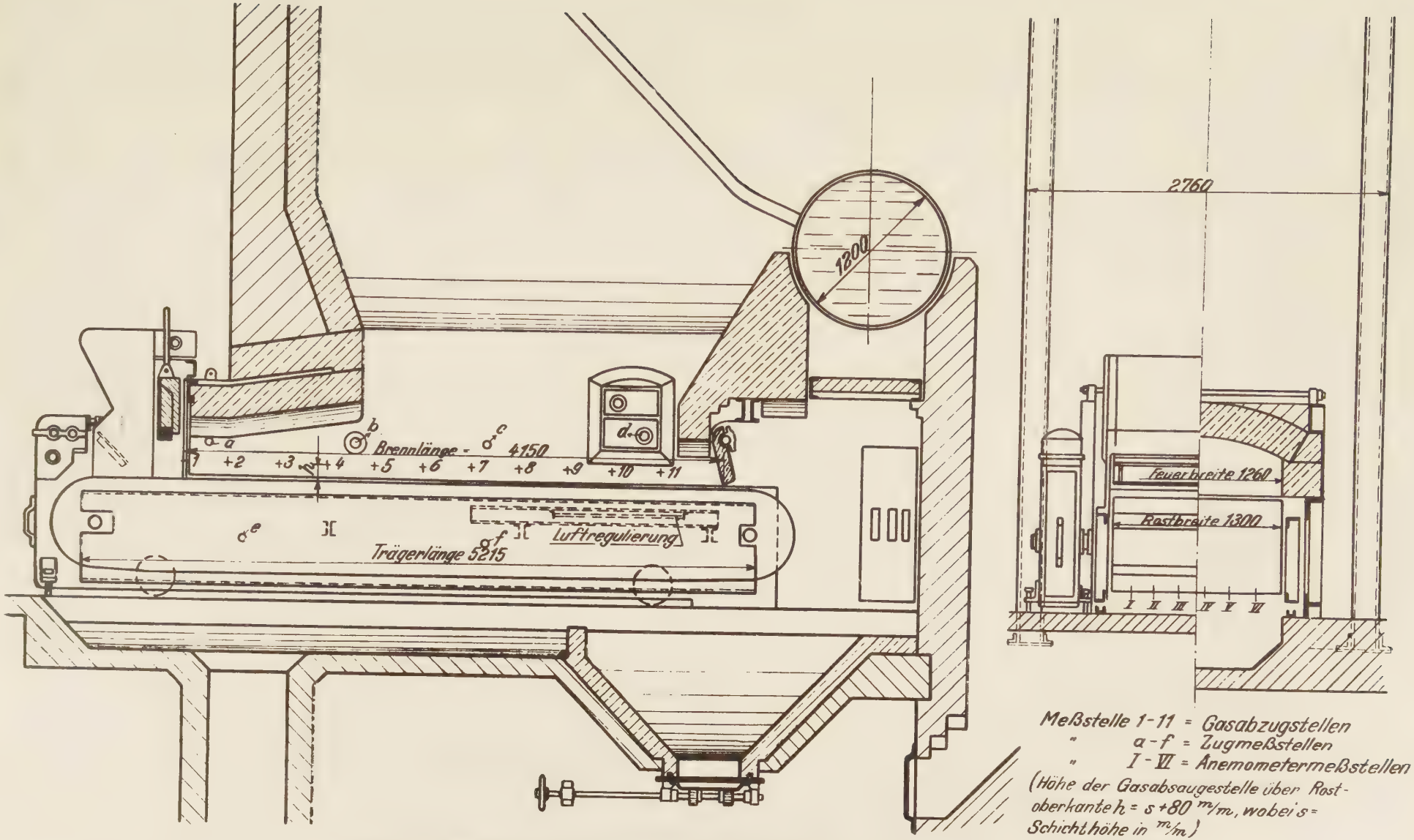


Abb. 1 Wanderrost mit Meßstellen.

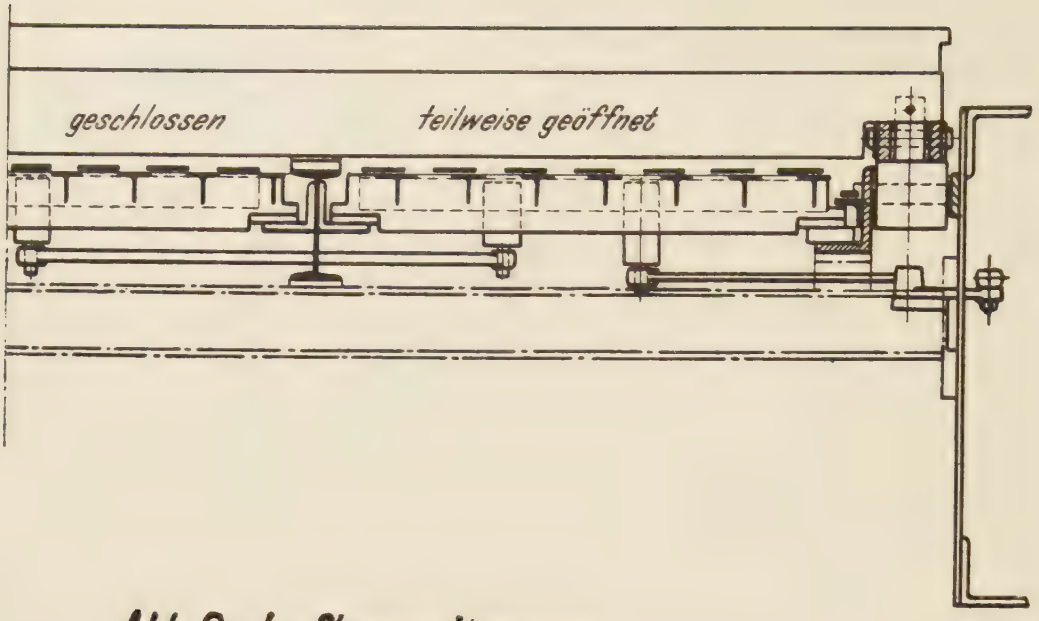
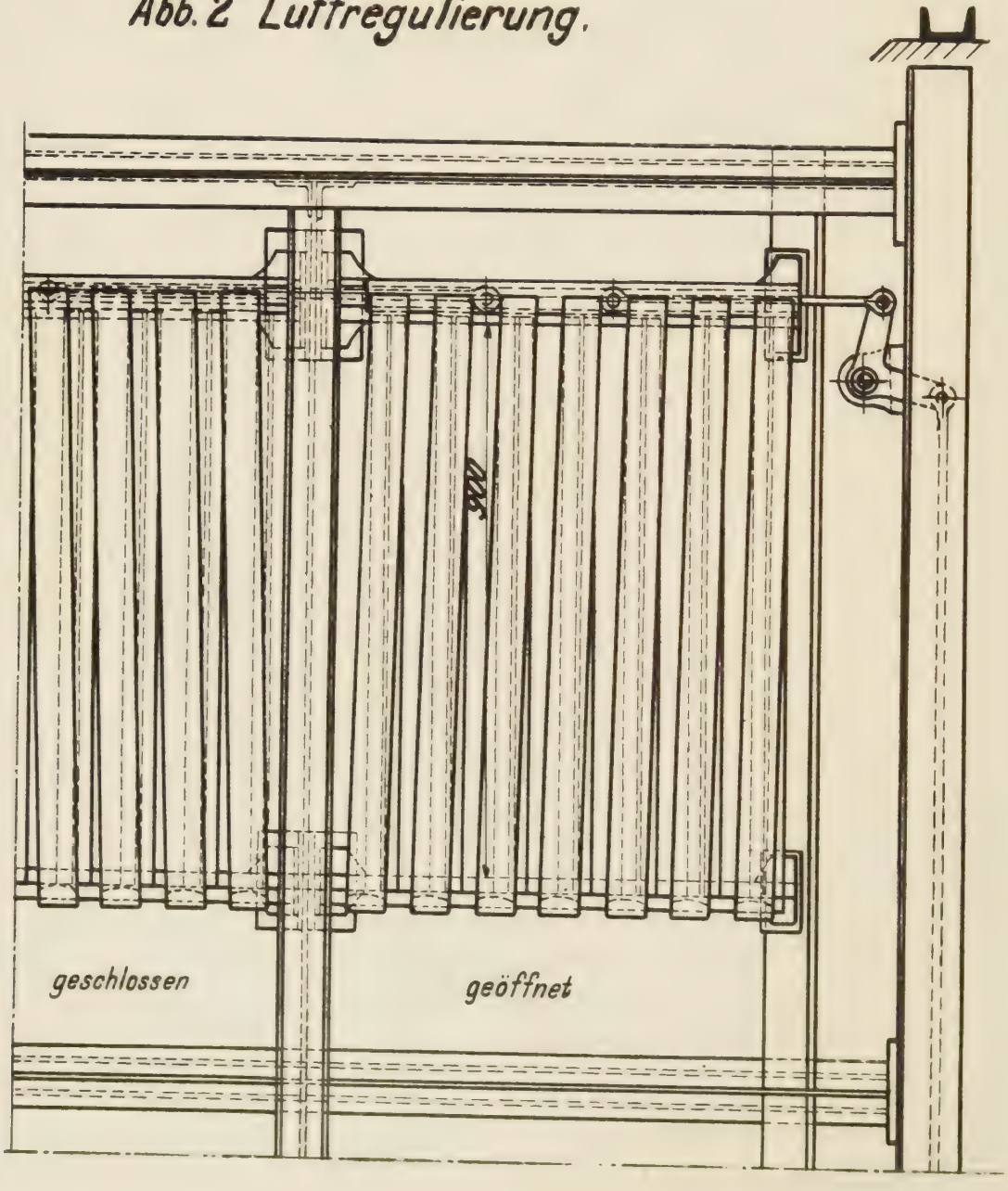


Abb. 2 Luftregulierung.



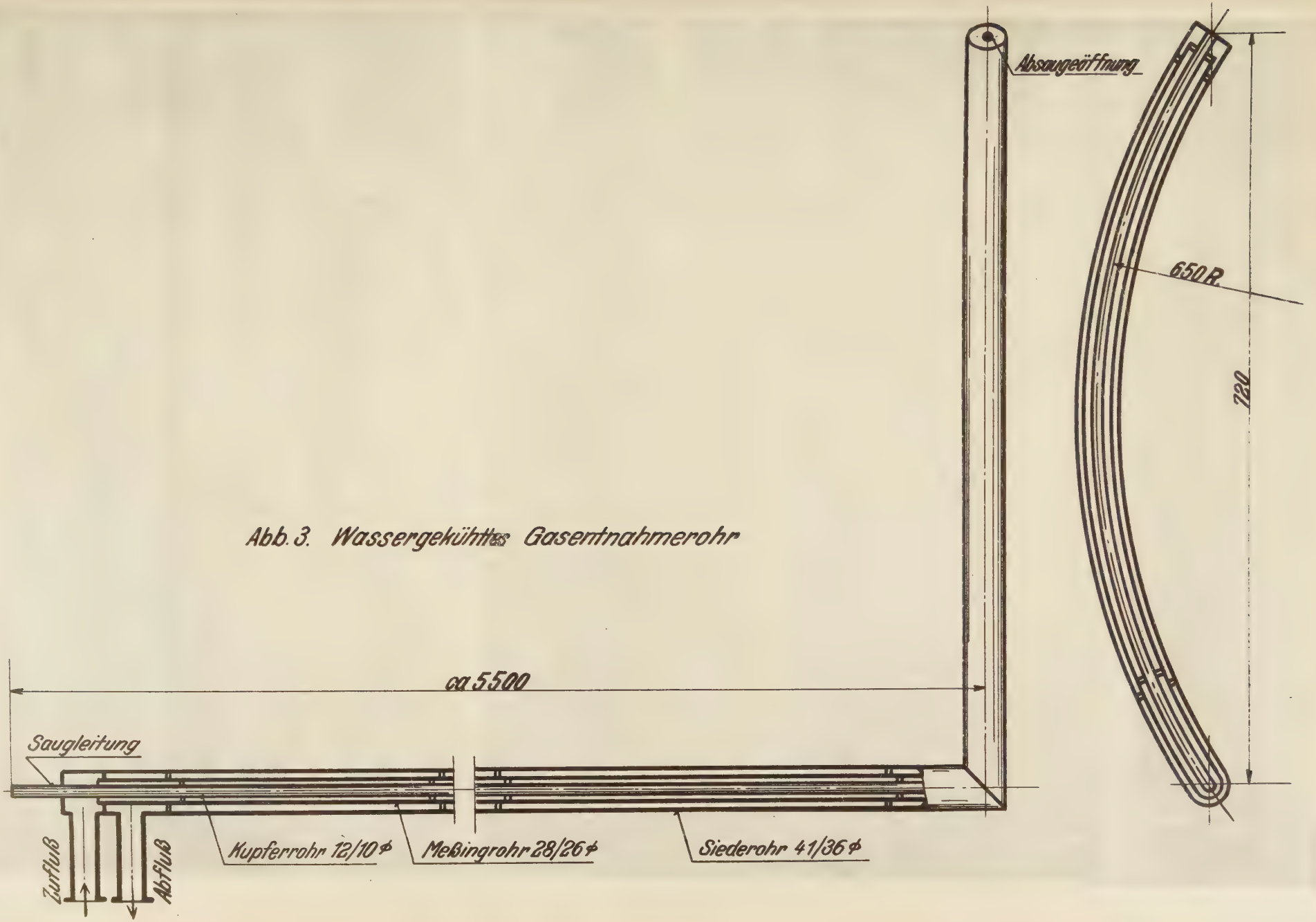
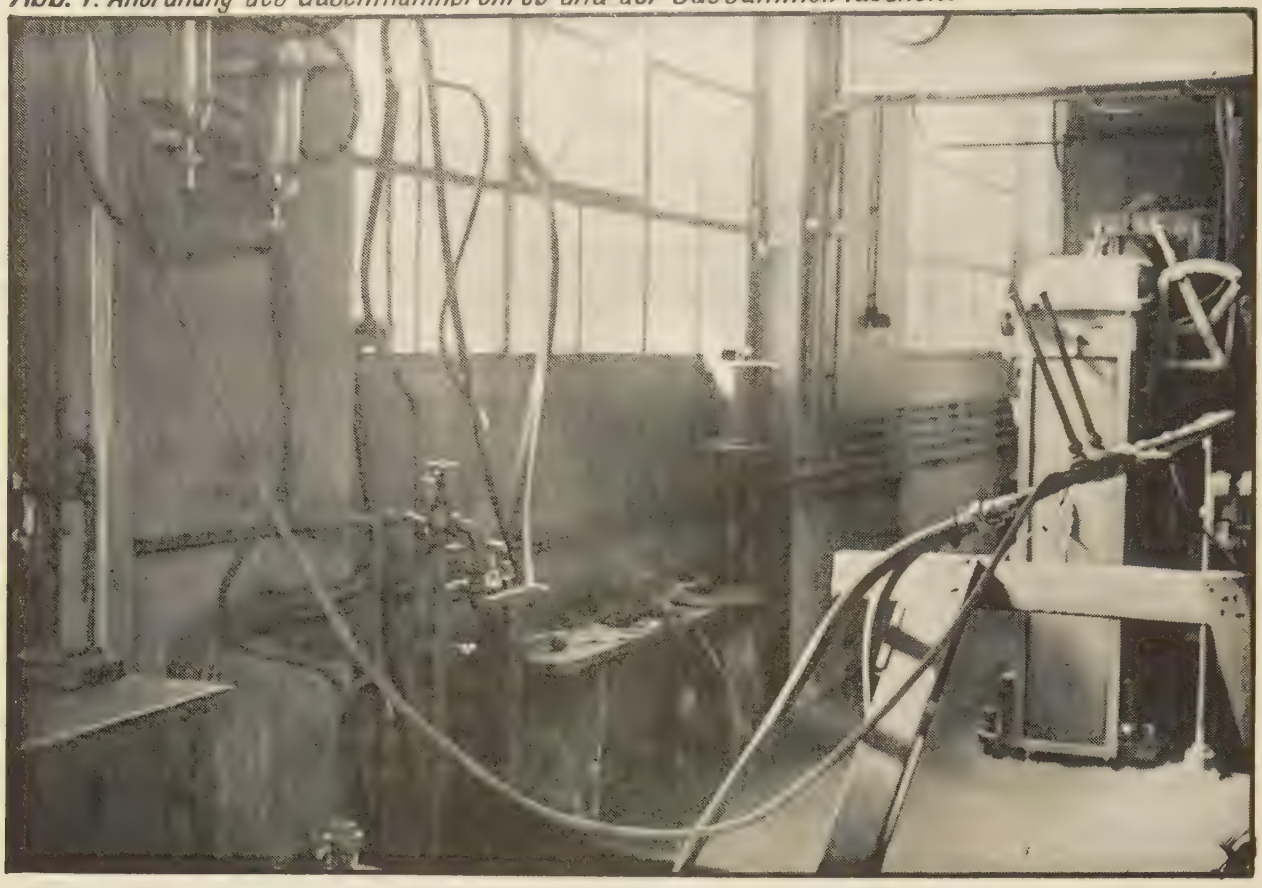


Abb. 3. Wassergekühltes Gasentnahmerohr

Abb. 4. Anordnung des Gasentnahmerohres und der Gassammelflaschen.



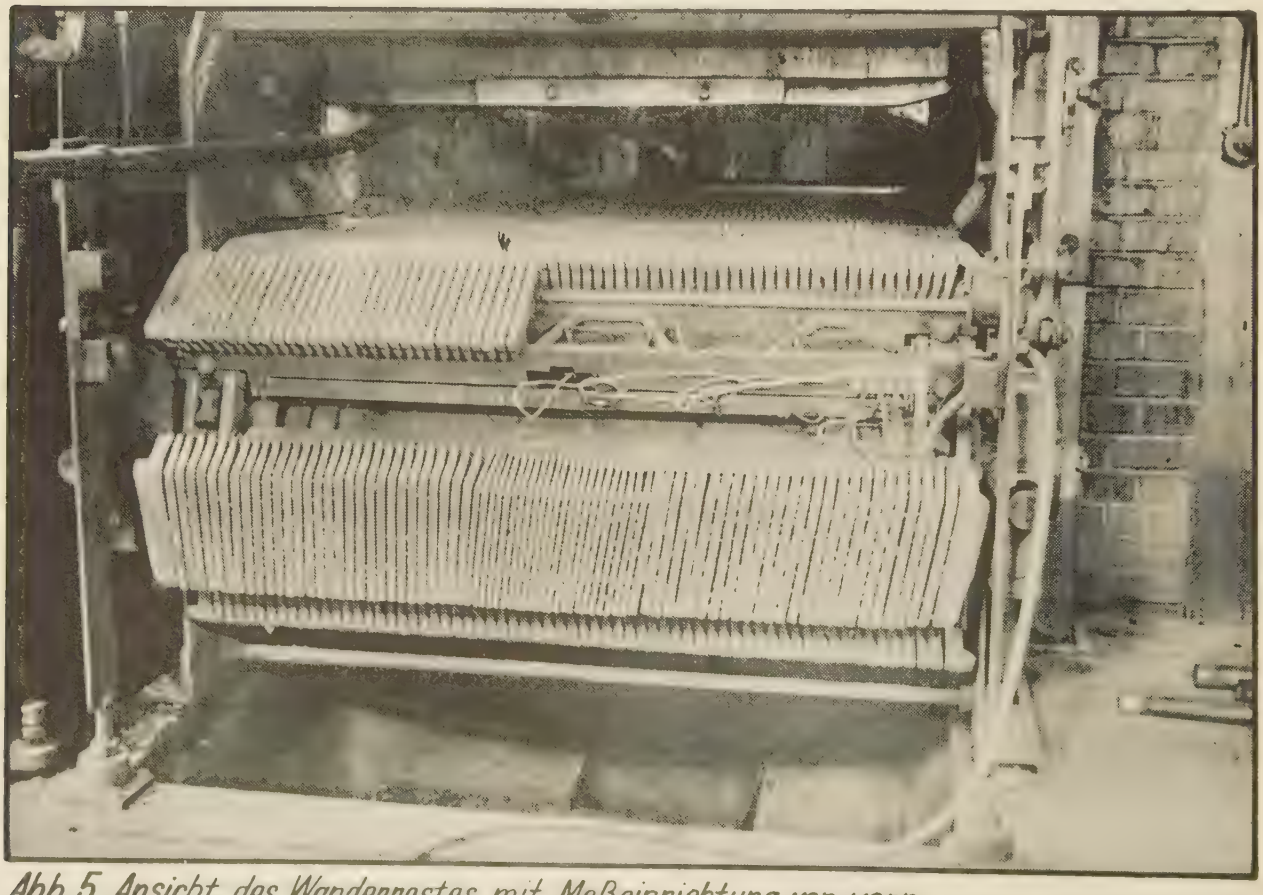


Abb. 5. Ansicht des Wanderrostes mit Meßeinrichtung von vorn.

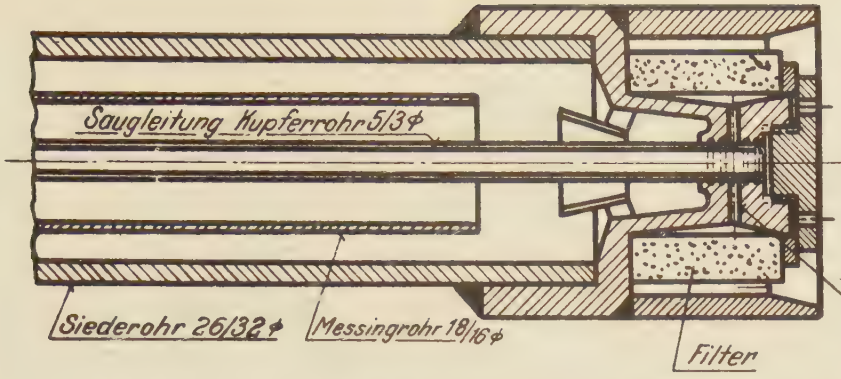
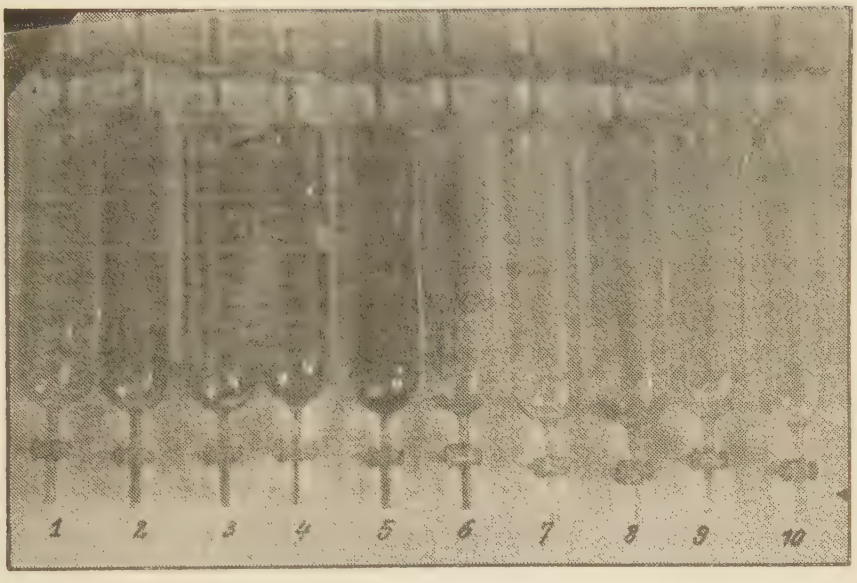


Abb. 6
Filterkonstruktion für Gasabsaugerohr

Abb. 7
Gefüllte Gassammelflaschen

Die Zahlen beziehen sich auf die Meßstellen der Abb. 1



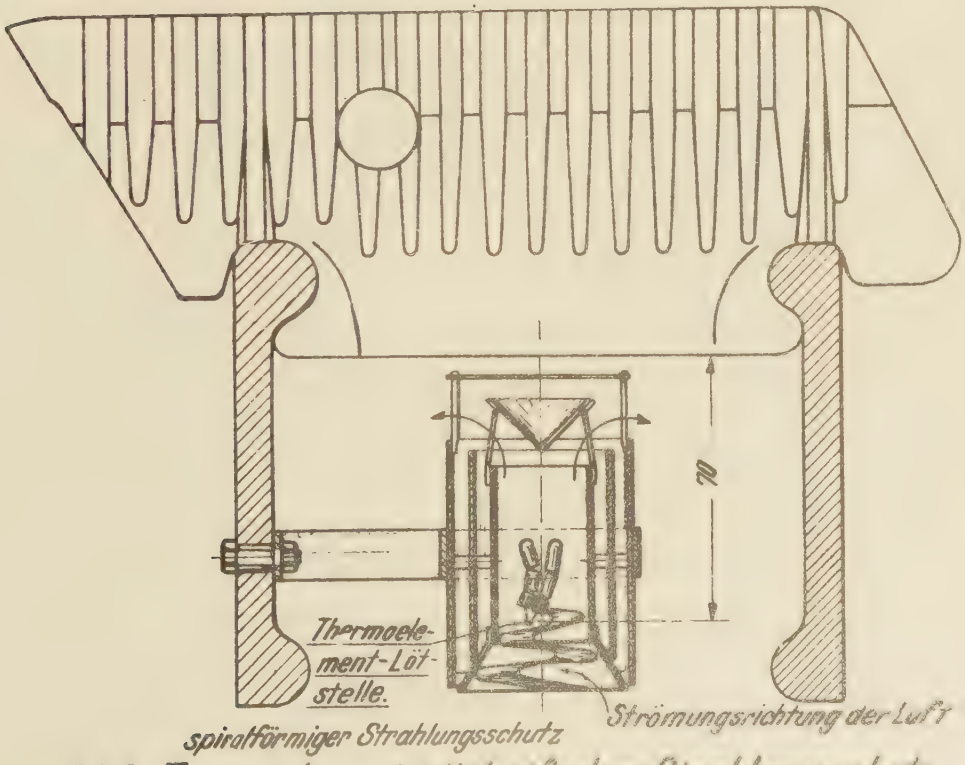


Abb. 8. Thermoelement mit dreifachem Strahlungsschutz

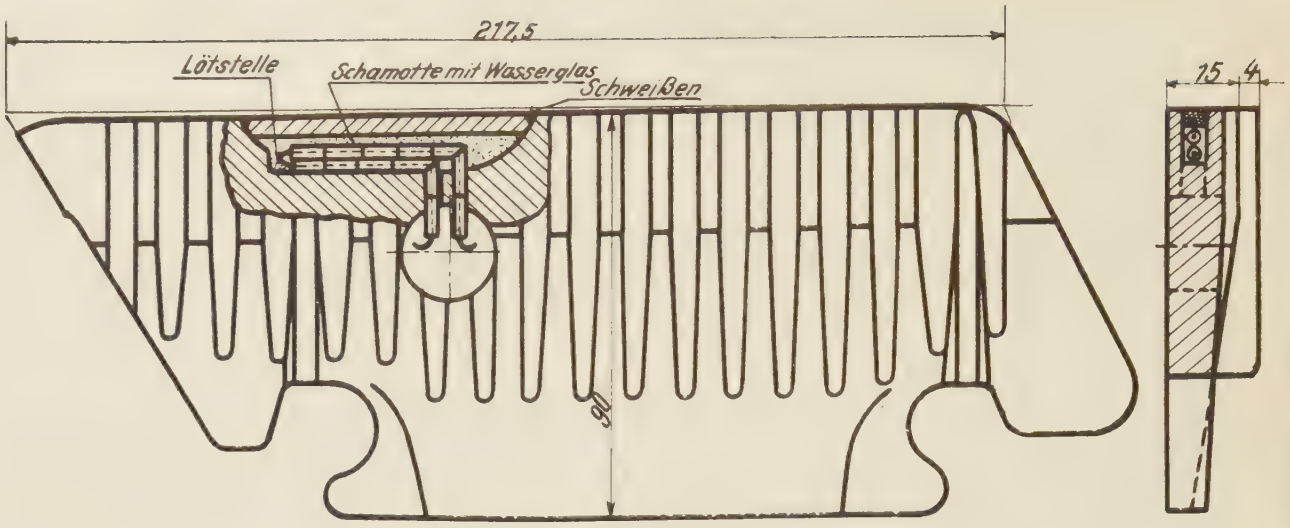


Abb. 9. Roststab mit Thermoelement

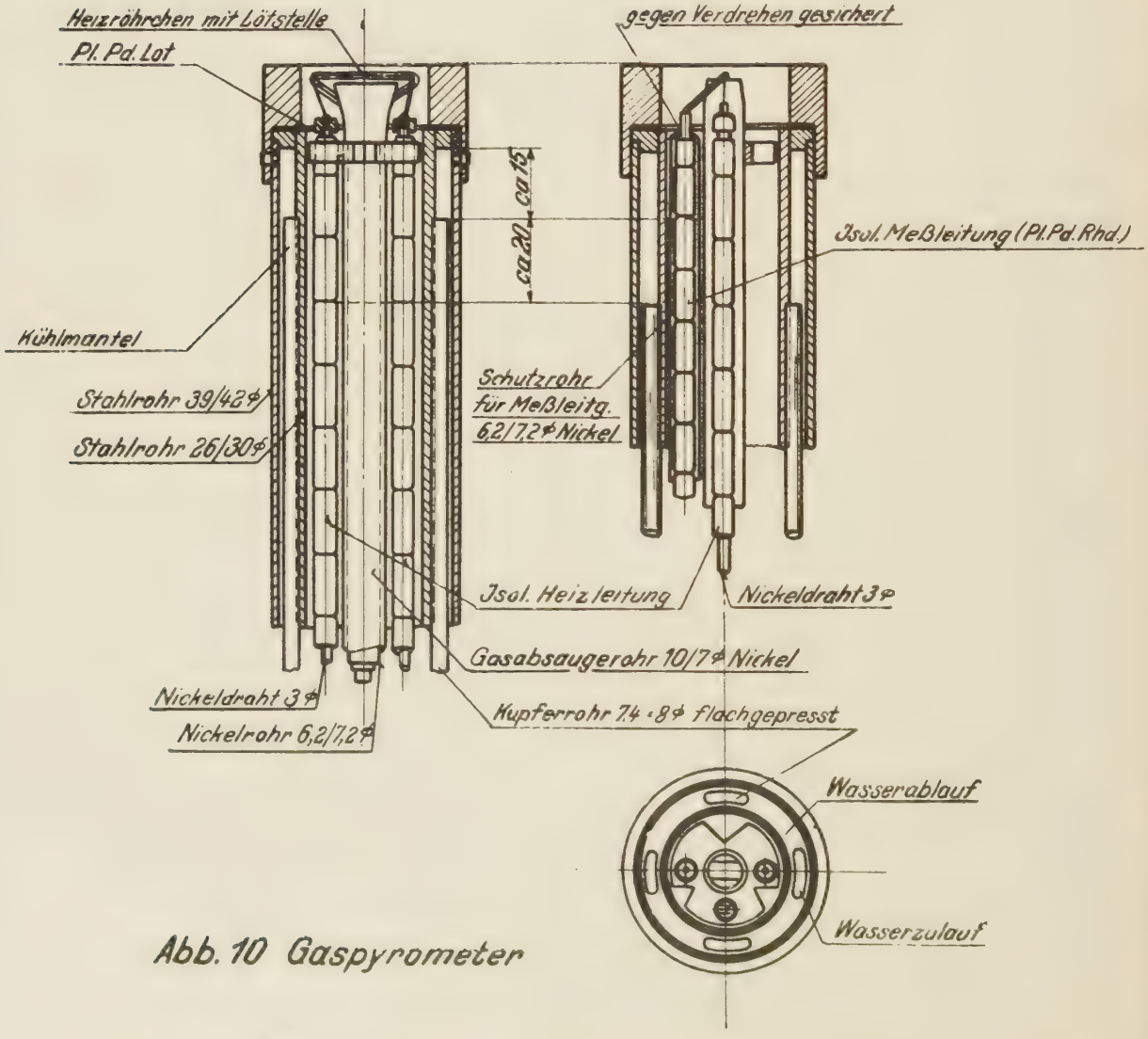


Abb. 10 Gaspyrometer

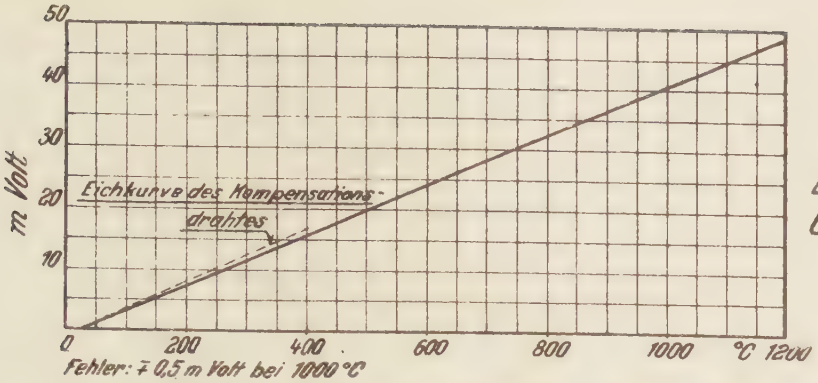


Abb. 11.
Eichkurve für
Chromnickel-Thermoelement

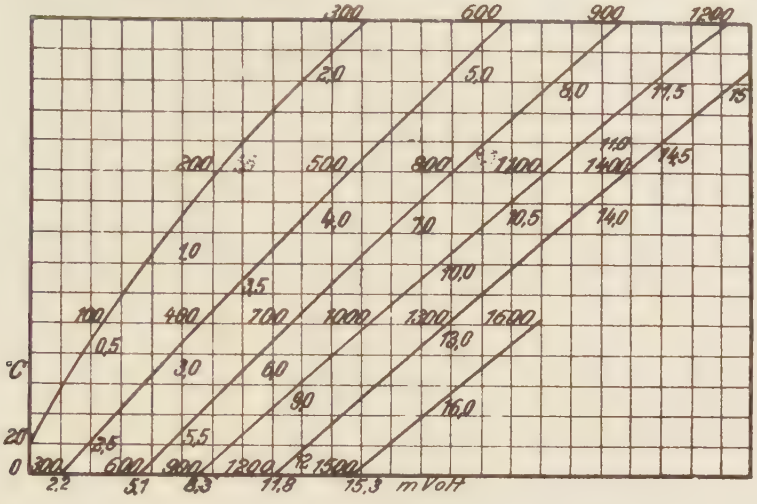


Abb. 12.
Eichkurve zum Pt - Pt. Rh. Thermoelement, v. H. u. B.

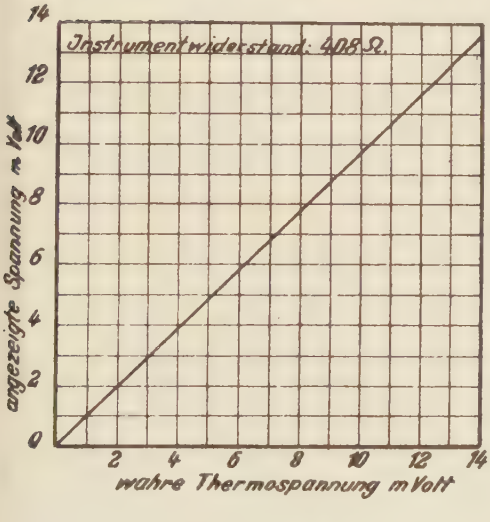


Abb. 13.
Wahre Thermospannung des Absaugepyrometers. Abhängig von der abgelesenen Spannung.
(Berichtigt durch Kompensationsverfahren nach Lindeck-Rothe)

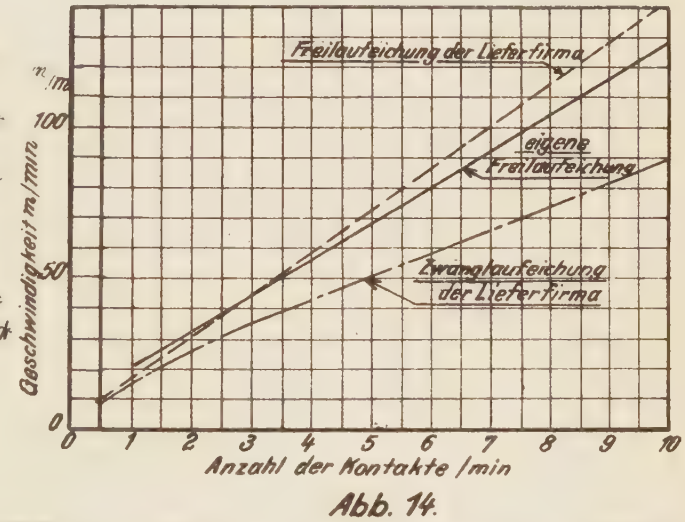


Abb. 14.
Eichkurven des Anemometers Nr. 19172

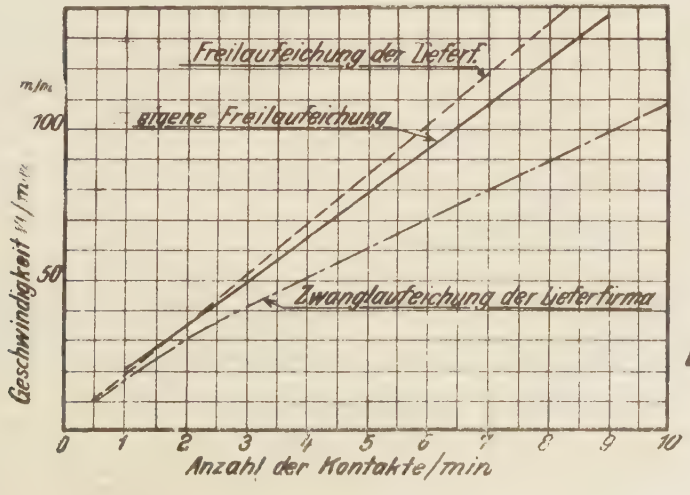


Abb. 15
Eichkurven des Anemometers Nr. 19618

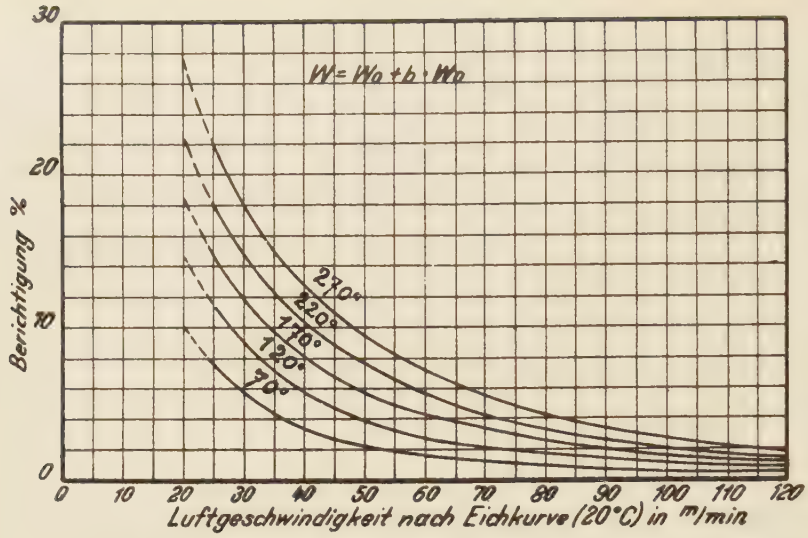


Abb. 16 Berichtigung der Luftgeschwindigkeit bei gegen die Eichung (20°C) veränderter Lufttemperatur.

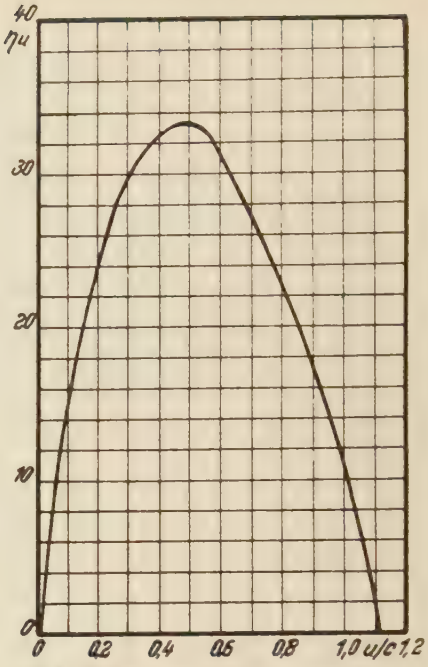


Abb. 17. Umfangswirkungsgrad ηu für das Anemometer T 19172

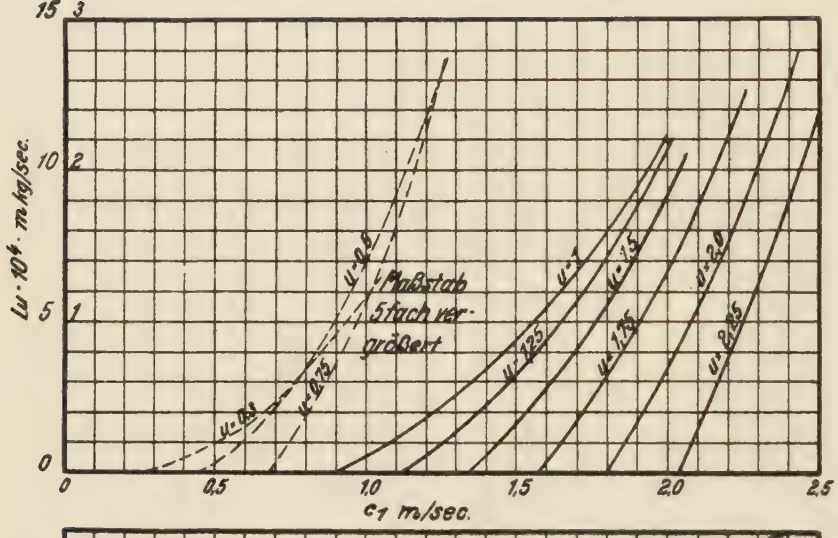
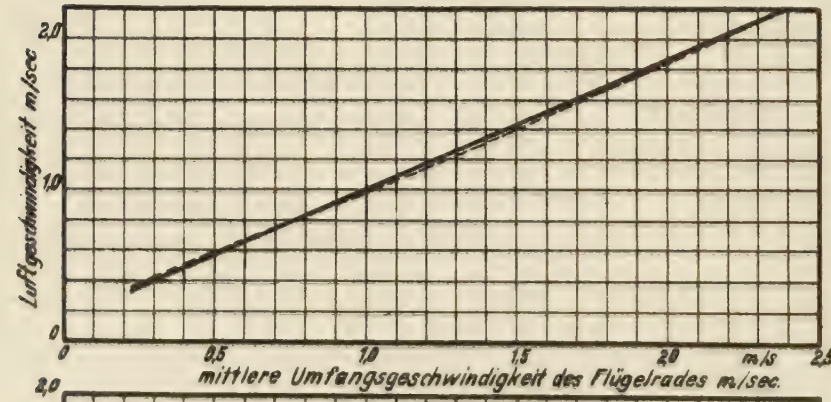


Abb. 18
Umfangsleistung Lu für u = const. abhängig v.d. Luftgeschwindigk.



---- theoret. Eichkurve
—— wirkliche " "

Abb. 19
Vergleich der Eichkurve des Anamometers T 19172 mit d. theor. ermittelten.

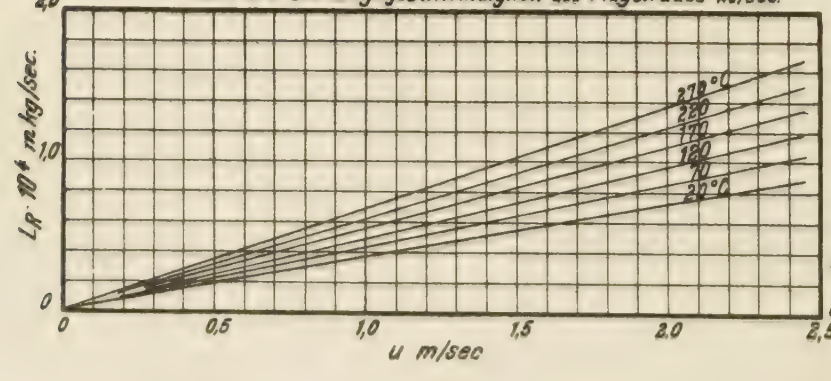
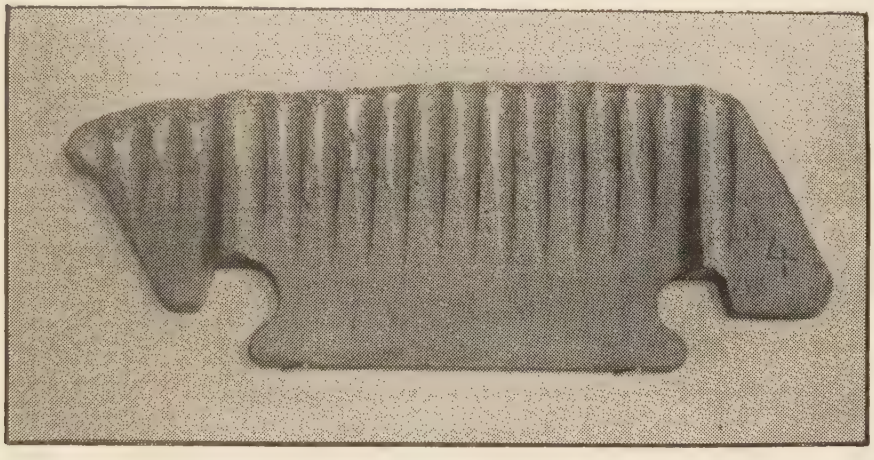


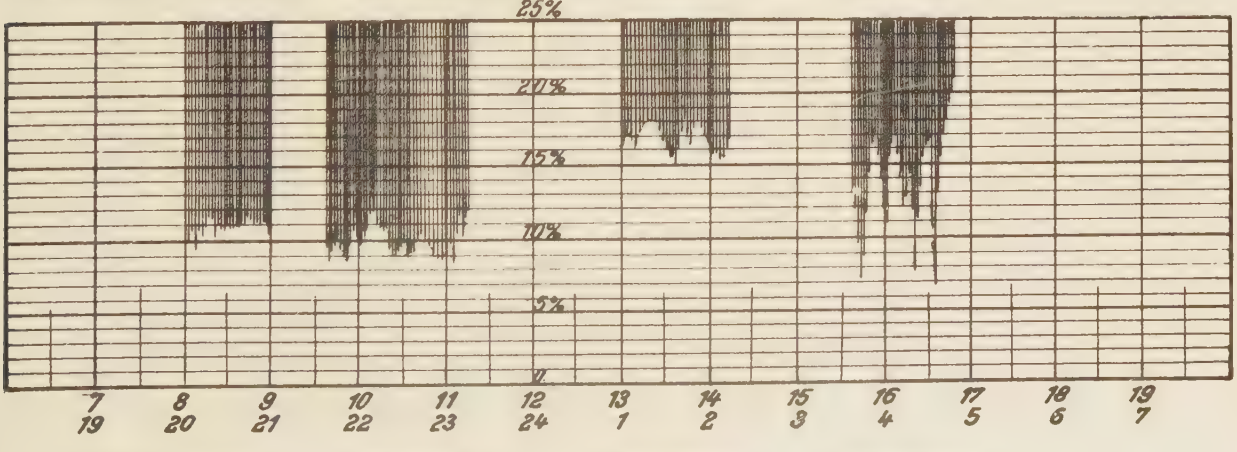
Abb. 20
Reibungsleistung entsprechend verschiedenen Temperaturen. Anemometer T 19172

Abb. 21
Blick auf den Rost vor der Feuerbrücke

Abb. 22
Stark beanspruchtes Rostglied.



Schichthöhe: 7 cm, Gang Nr. 5, Luftschieber Nr. 0, Zug am Kesselende 15,5 - 16 m/m H_2O



Entfernung vom Meßst. A — Meßstelle B — Meßstelle C — Meßstelle D
Schichtregler: 0,8 m — 1,6 m — 2,4 m — 3,2 m

Abb. 23. CO_2-Gehalt der Feuergase in einer bestimmten Meßstelle bei gleich bleibendem Zustand des Feuerungsbetriebes.

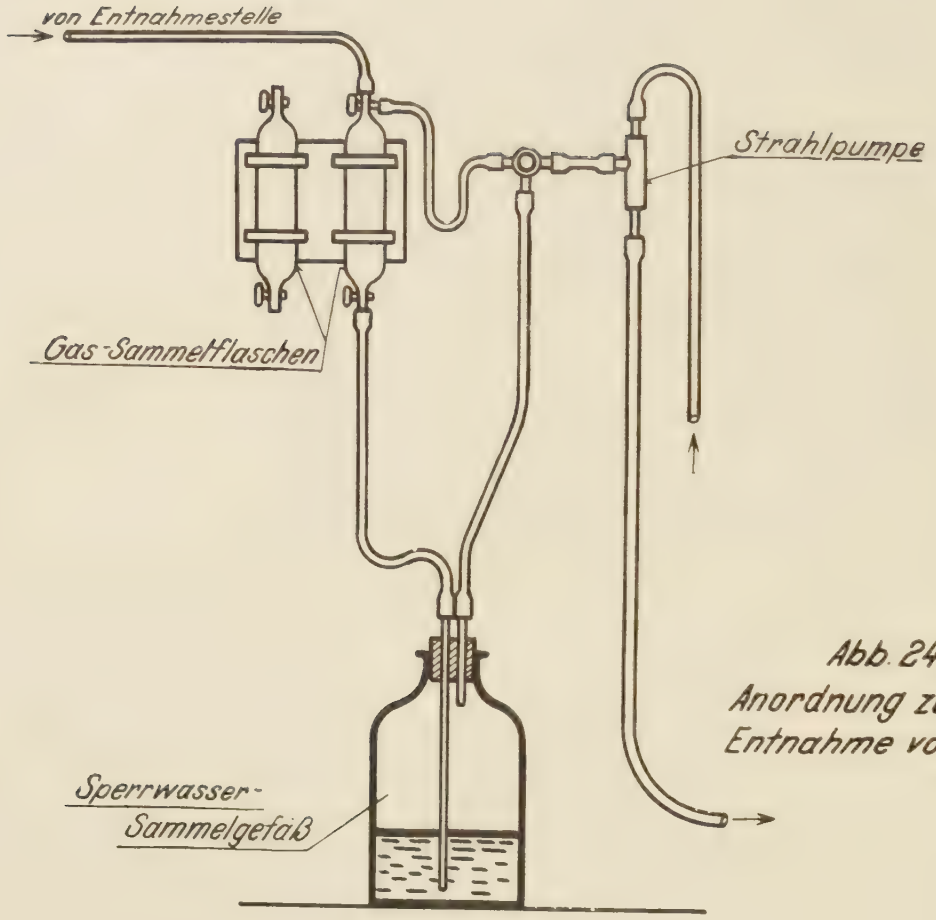


Abb. 24.
Anordnung zur schnellen Entnahme von Gasproben.

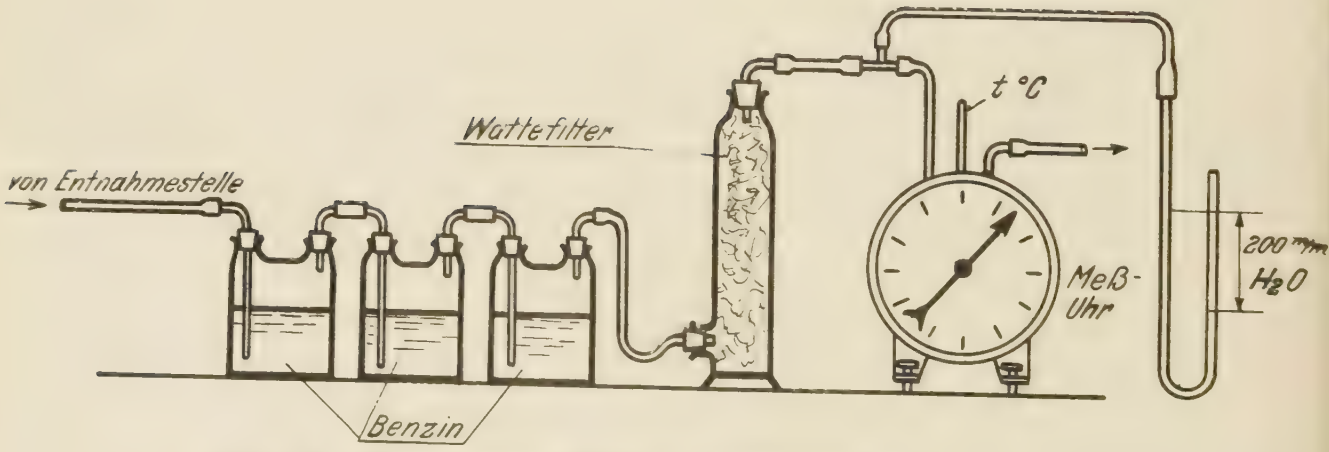


Abb. 25. Anordnung für Rußbestimmung.

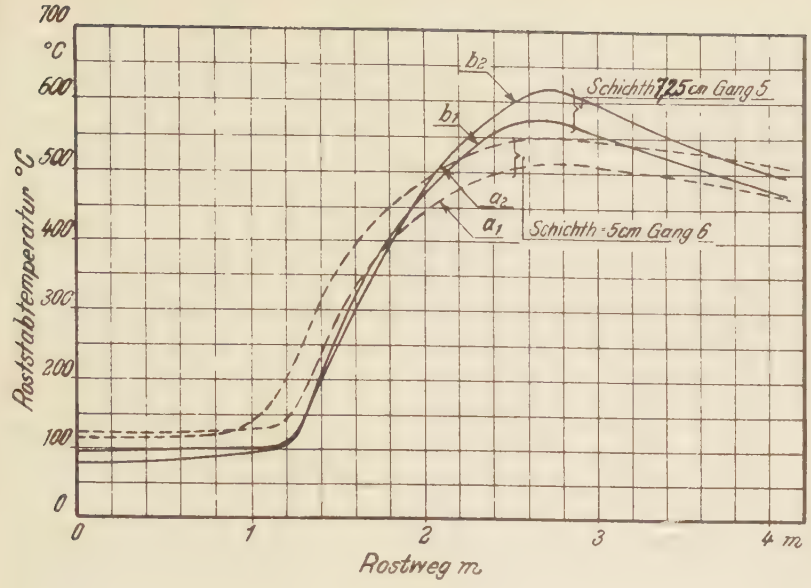


Abb. 26.
Verlauf der Raststabtemperaturen bei 5 u. 7 cm Schichthöhe (Versuch v. 21. u. 22. 2. 33. Meßstelle ca 8-9 m/m v. Rostoberkante.)

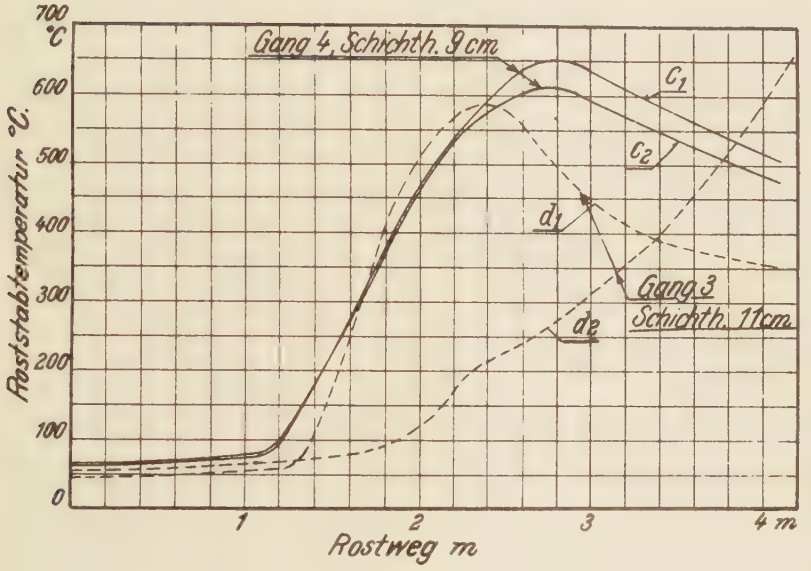


Abb. 27
Verlauf der Raststabtemperatur bei 9 u. 11 cm Schichthöhe.
(Versuche v. 17. 21. u. 23. 2. 33. Meßstelle ca 8-9 m/m von Rostoberkante.)

Rostweg von der Innenkante des Schichtreglers ausgemessen.

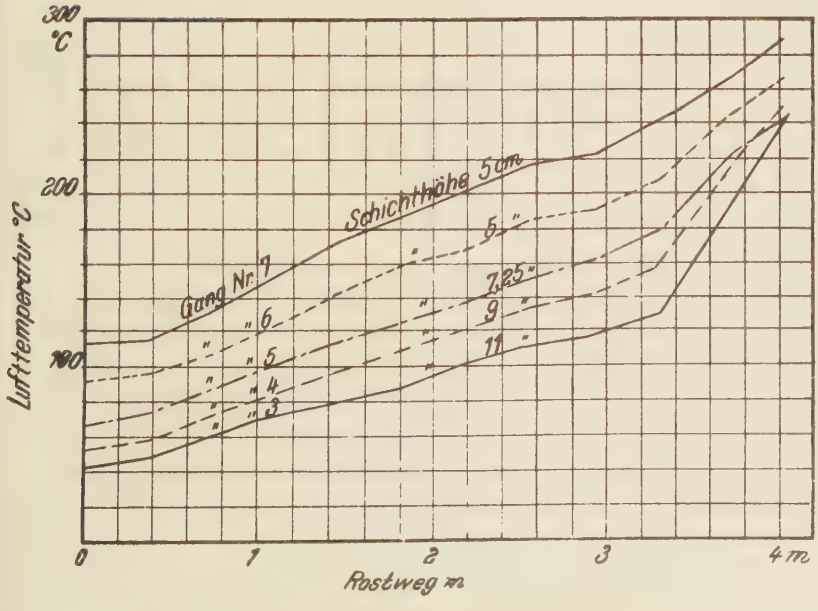


Abb. 28.
Mittlere Lufttemperatur unter dem oberen Rostband bei verschiedenem Rostvorschub.
(Luftregulierung: Stellung 0 bei allen Versuchen.) Meßstelle ca 70 m/m unt. Rost.

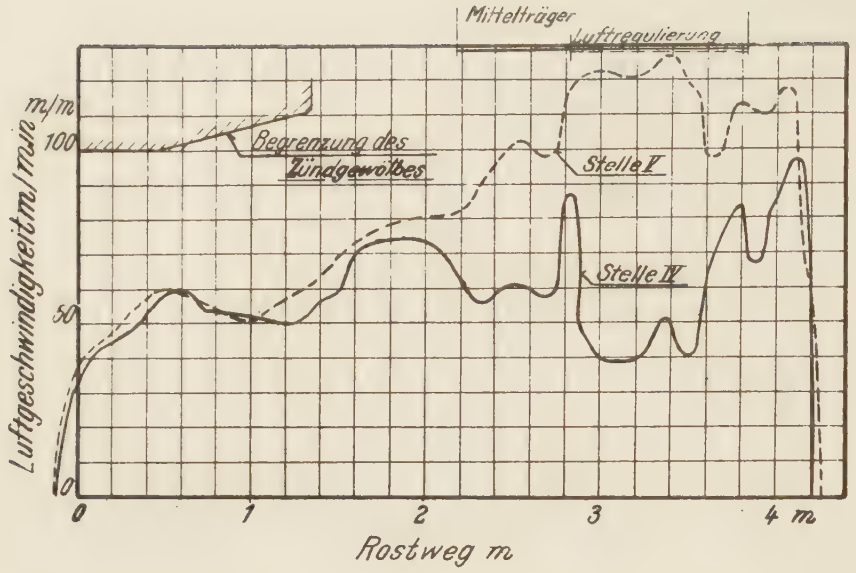


Abb. 29.
Versuch 1 vom 13.4.32.
Schichthöhe = 5 cm

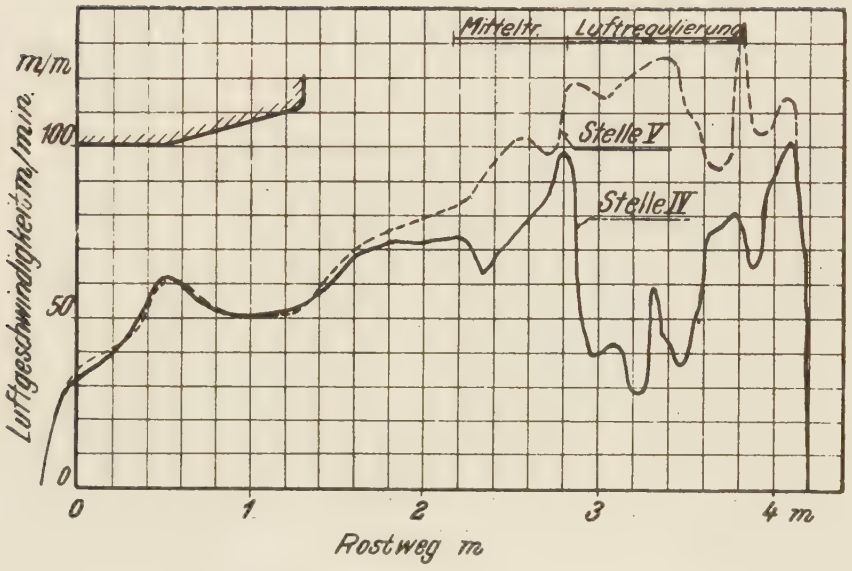


Abb. 30.
Versuch 2 vom 13.4.32.
Schichthöhe = 5,3 cm

Rostweg von der Innenseite des Schichtreglers aus gemessen.

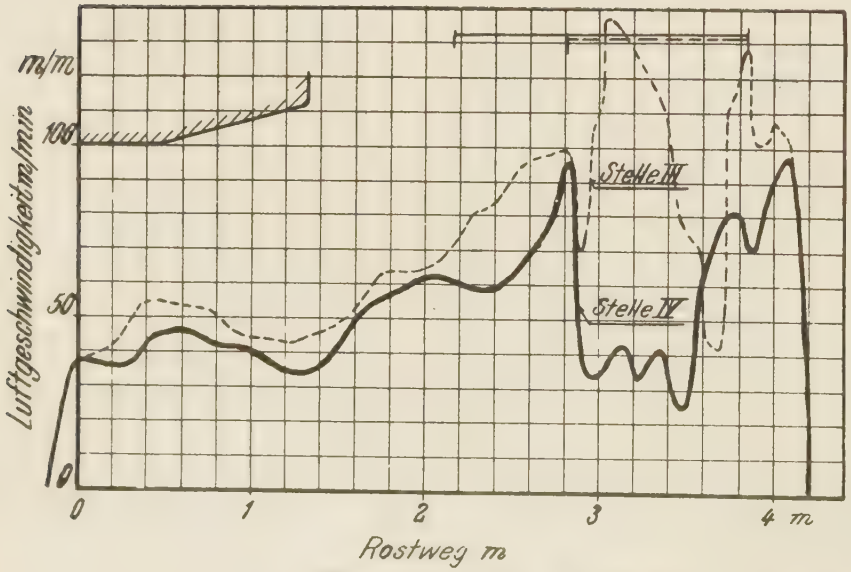


Abb. 31.
Versuch 3. vom 16.4.34.
Schichthöhe 7 cm

Gemessene Luftgeschwindigkeit.

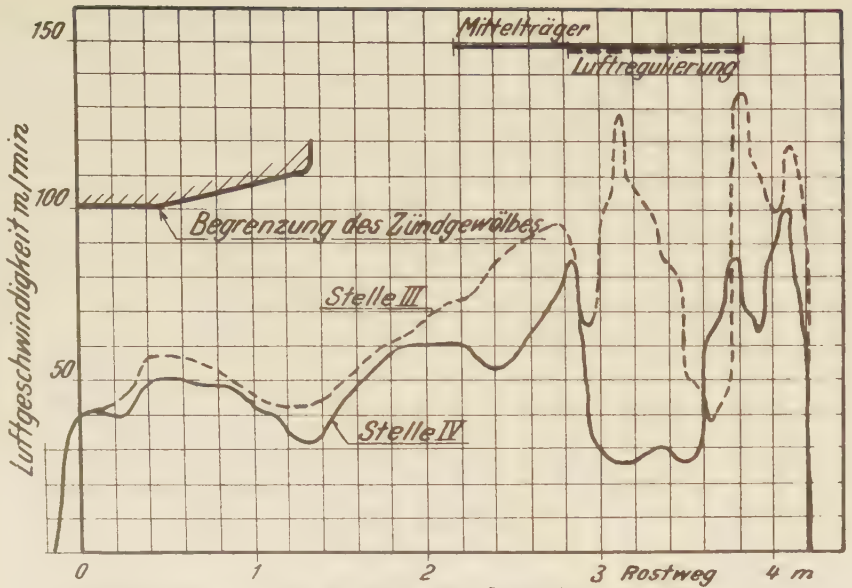


Abb. 32 Versuch 4 v. 16.4.32. Schichthöhe 7 cm

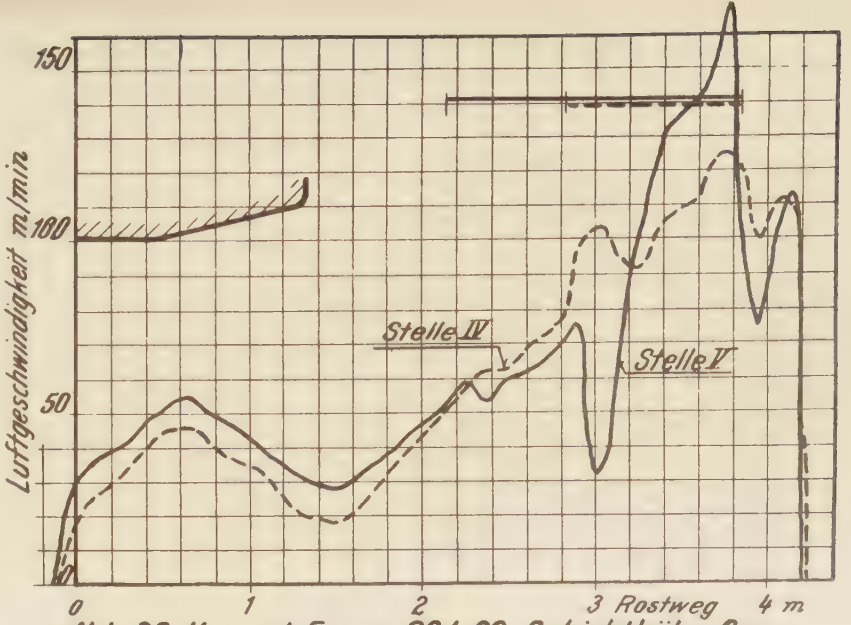


Abb. 33. Versuch 5 vom 20.4.32. Schichthöhe 9 cm

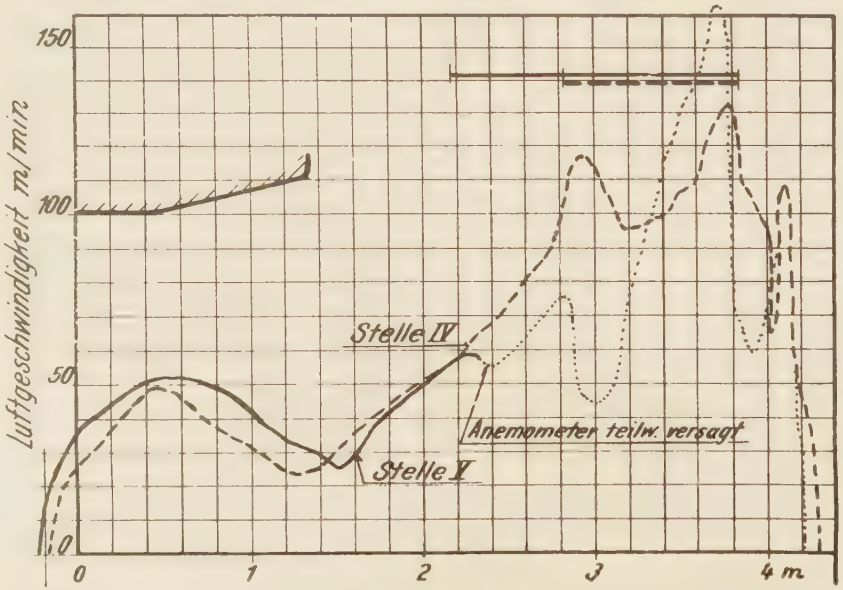


Abb. 34 Versuch 6 vom 20.4.32. Schichthöhe 9 cm

Rostweg v. Innenkante Schichtregler gemessen.

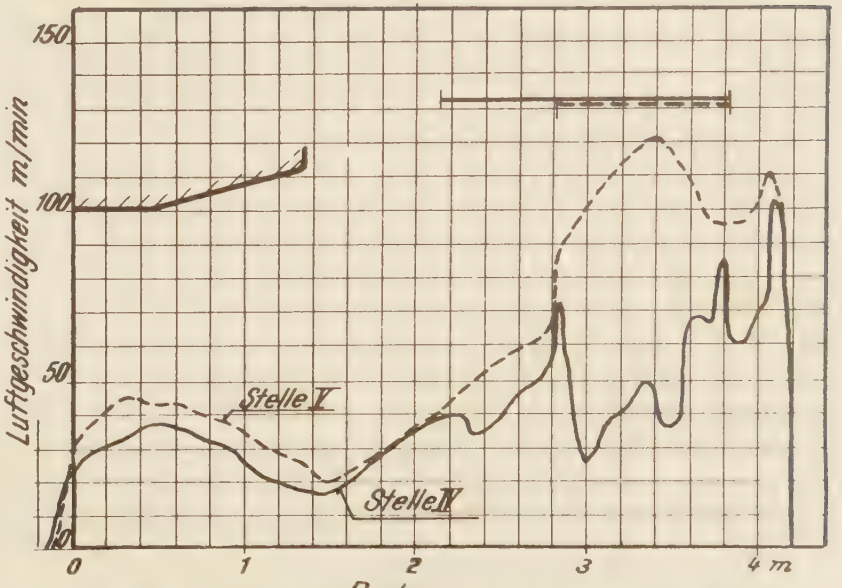


Abb. 35. Versuch 7 vom 11.5.32. Schichthöhe 11/10,8 cm

Gemessene Luftgeschwindigkeit

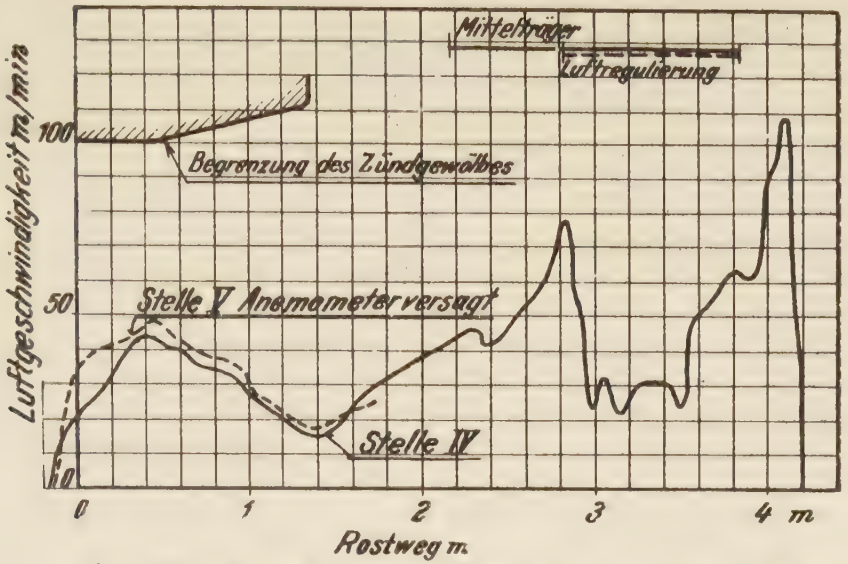


Abb. 36. Versuch 8 vom 11.5.32. Schichthöhe 11/10,8 cm

Rostweg von Innenkante Schichtregler gemessen.

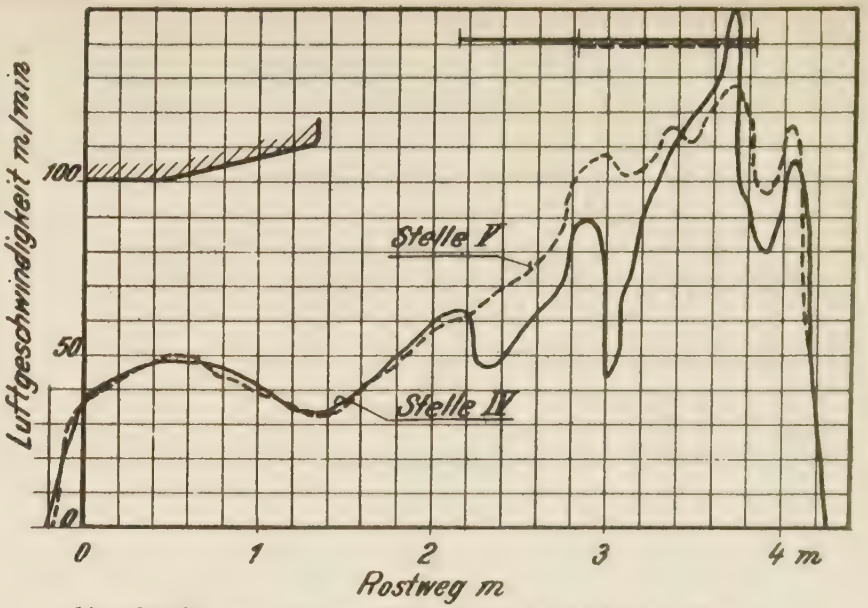


Abb. 37. Versuch 9 vom 18.3.32. Schichthöhe 7 cm

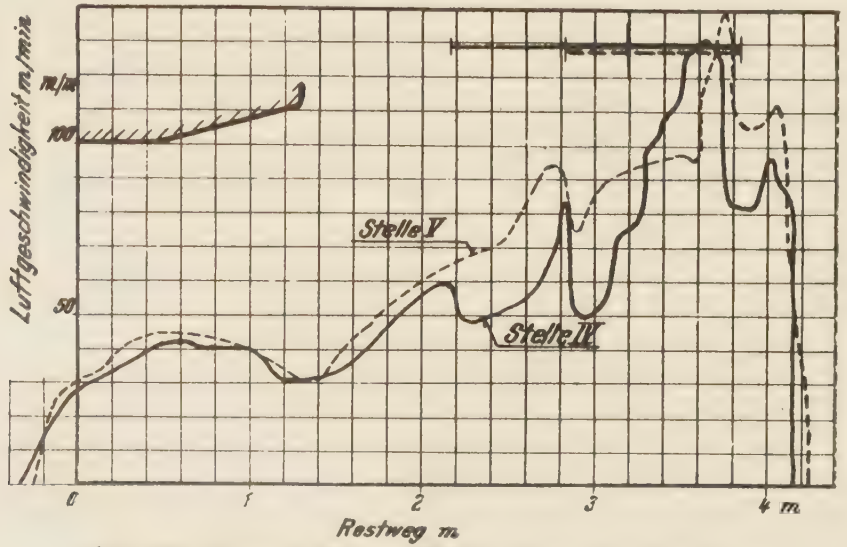


Abb. 38. Versuch 10 vom 18.3.32. Schichthöhe 7 cm

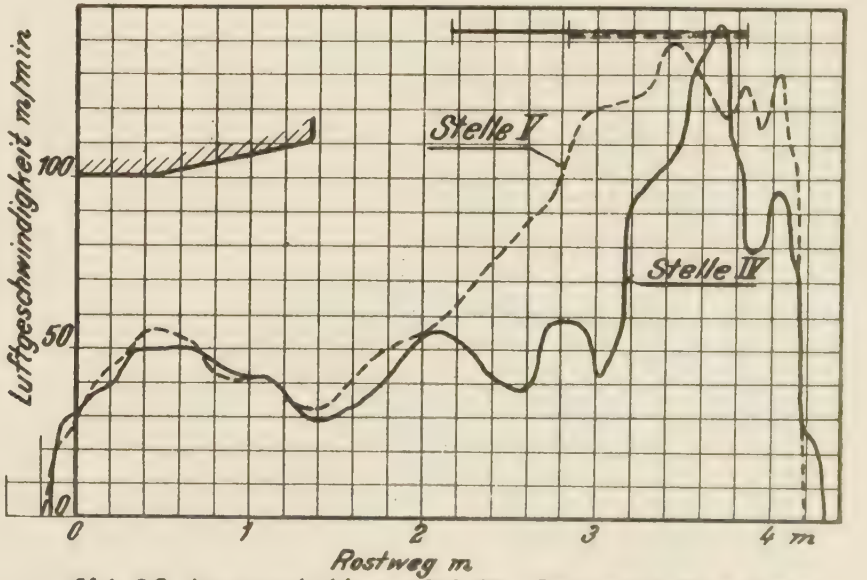


Abb. 39. Versuch 11 vom 8.4.32. Schichthöhe 9 cm

Gemessene Luftgeschwindigkeit

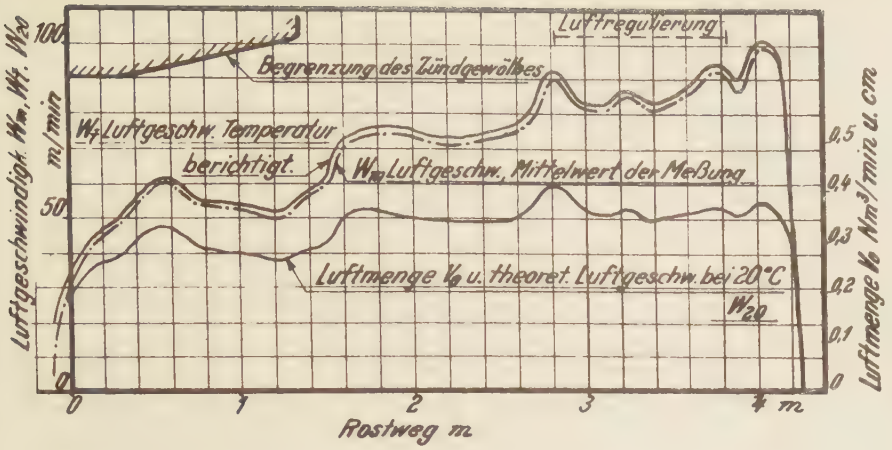


Abb. 40.
Versuch 1. vom 13.4.32.
Schichthöhe 5 cm.

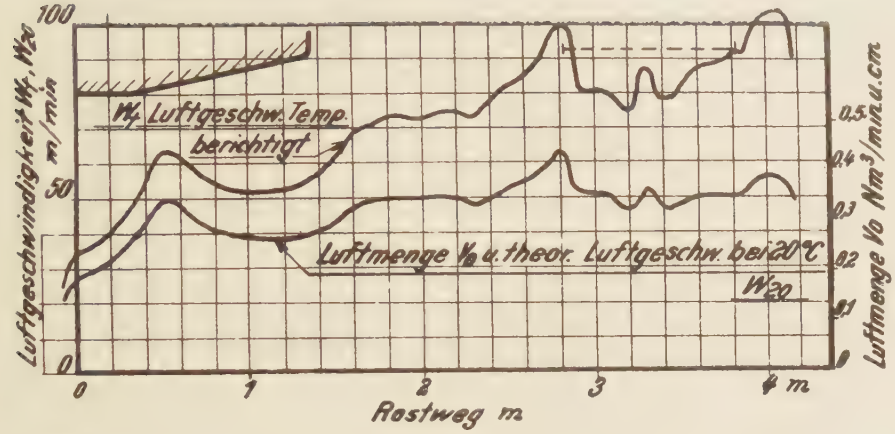


Abb. 41.
Versuch 2. vom 13.4.32.
Schichthöhe 5,3 cm.

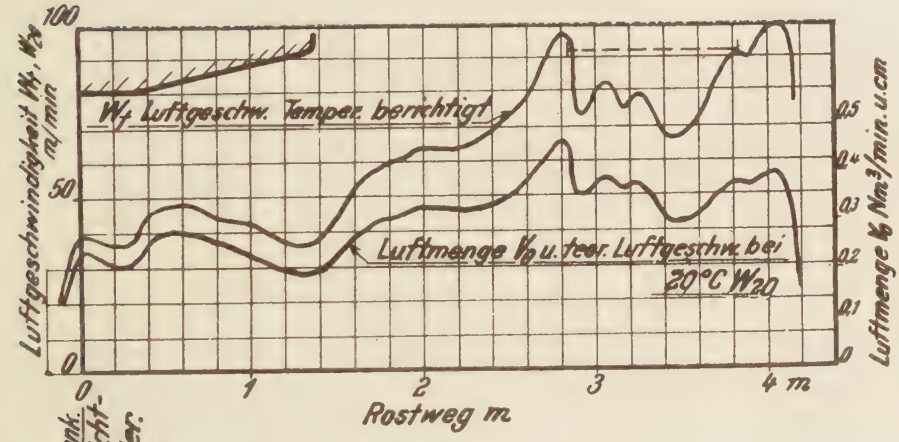


Abb. 42.
Versuch 3 vom 16.4.32.
Schichthöhe 7 cm.

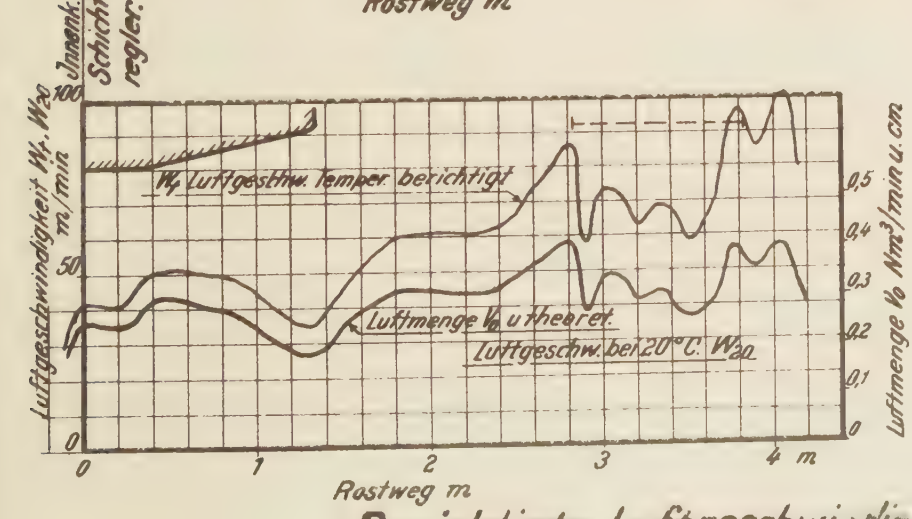


Abb. 43
Versuch 4 vom 16.4.32.
Schichthöhe 7 cm.

Berichtigte Luftgeschwindigkeit.

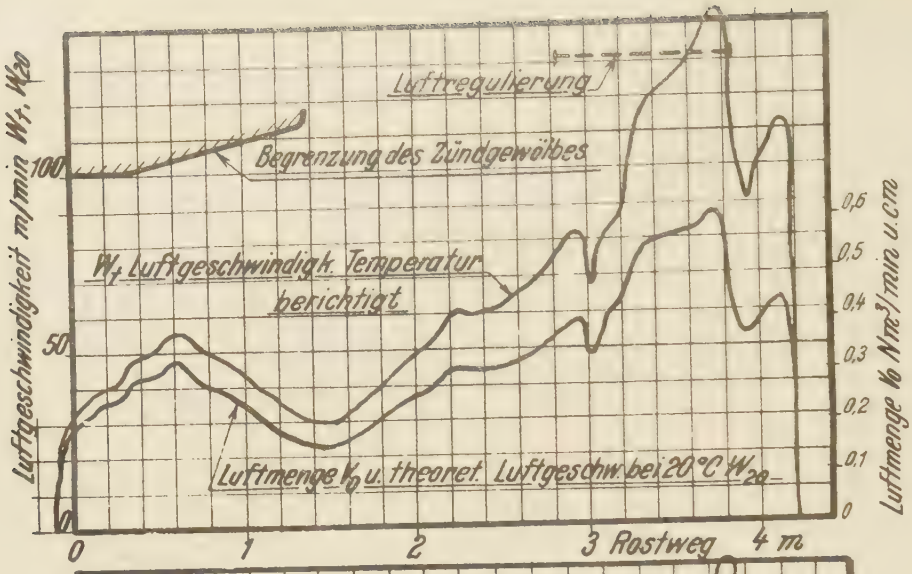


Abb. 44.
Versuch 5 vom 20.4.32.
Schichthöhe 9 cm

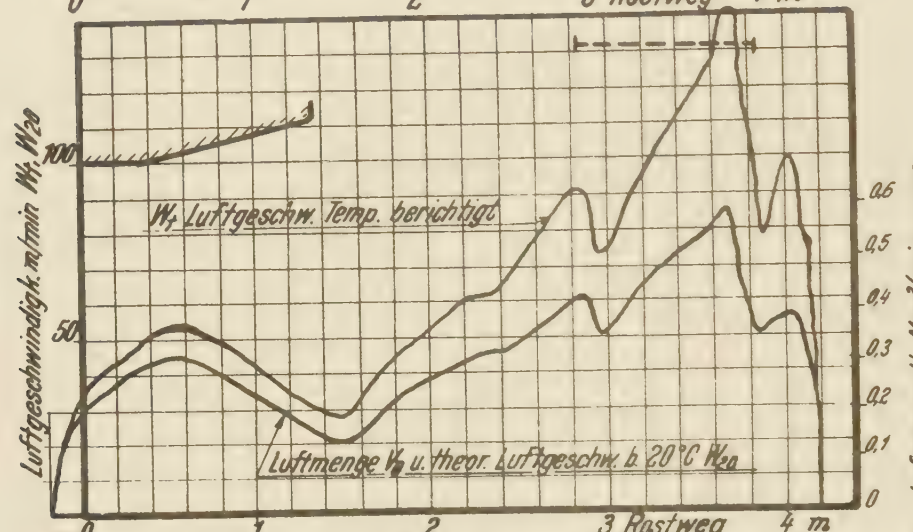


Abb. 45.
Versuch 6 vom 20.4.32
Schichthöhe 9 cm

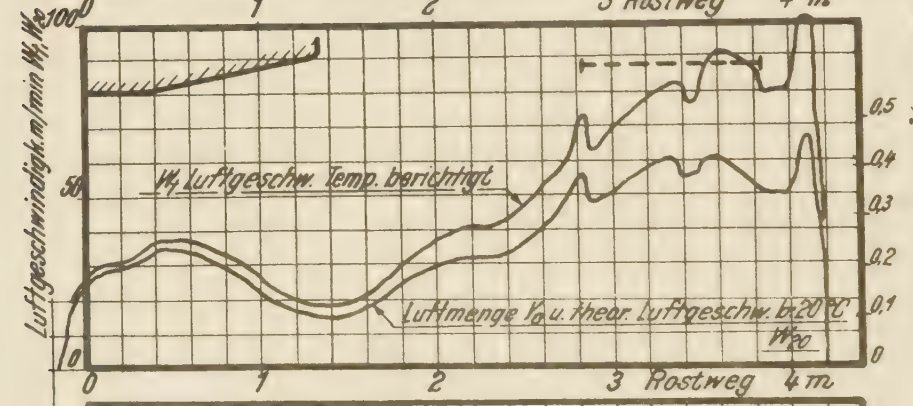


Abb. 46.
Versuch 7 vom 11.5.32
Schichthöhe 11 cm

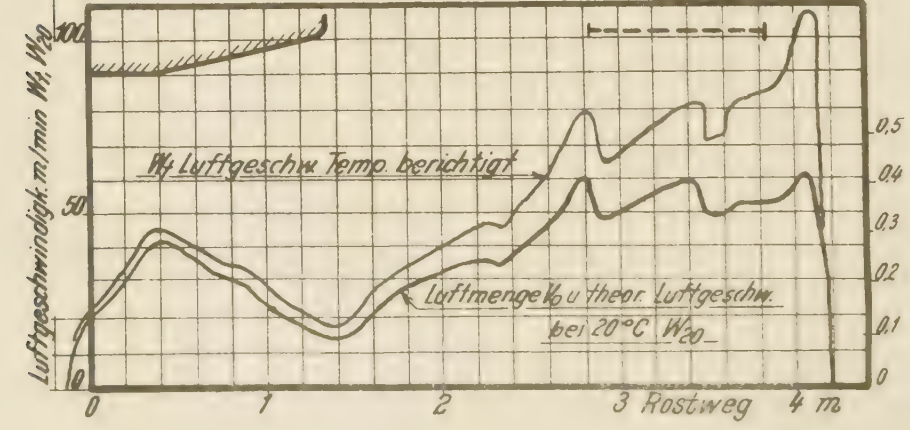


Abb. 47.
Versuch 8 vom 11.5.32.
Schichthöhe 11 cm

Berichtigte Luftgeschwindigkeit.

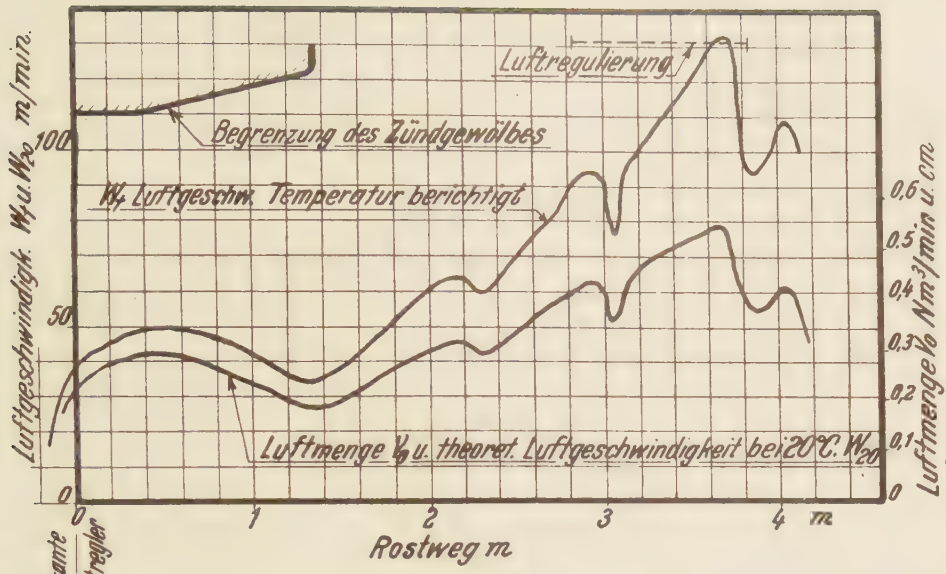


Abb. 48.
Versuch 9 vom 18.3.32.
Schichthöhe 7cm.

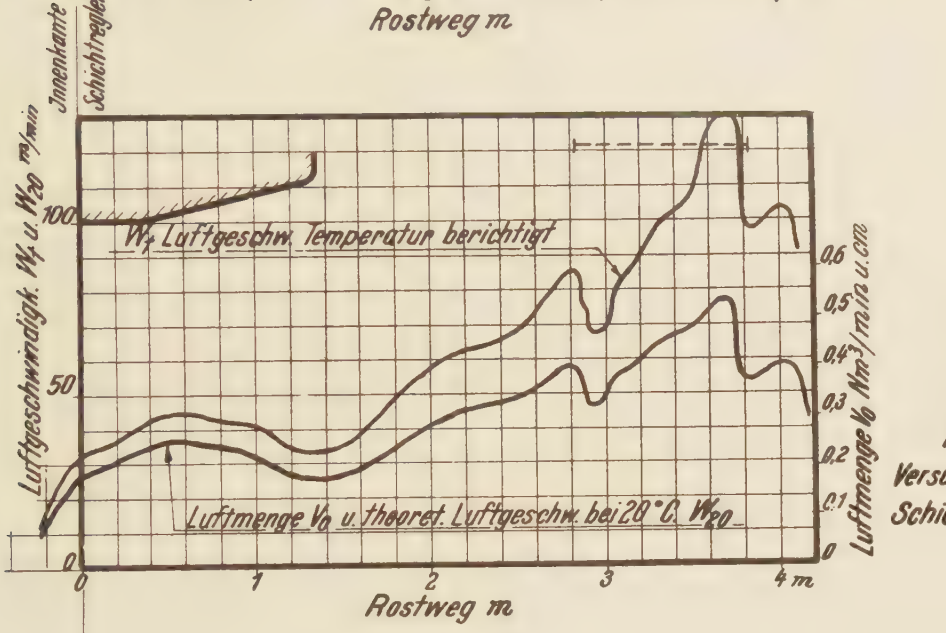


Abb. 49.
Versuch 10 vom 18.3.32.
Schichthöhe 7 cm

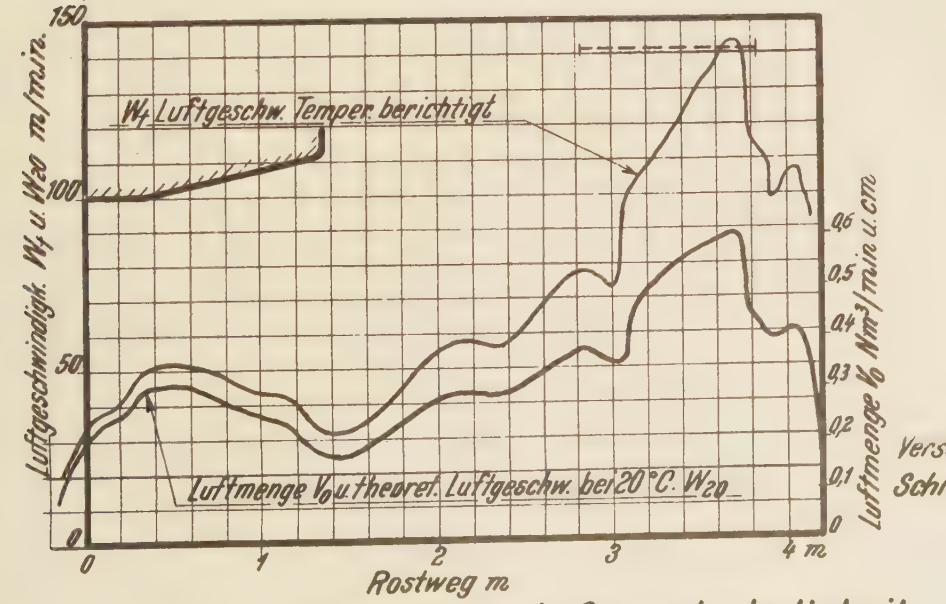


Abb. 50.
Versuch 11 vom 8.4.32
Schichthöhe 9 cm

Berichtigte Luftgeschwindigkeit.

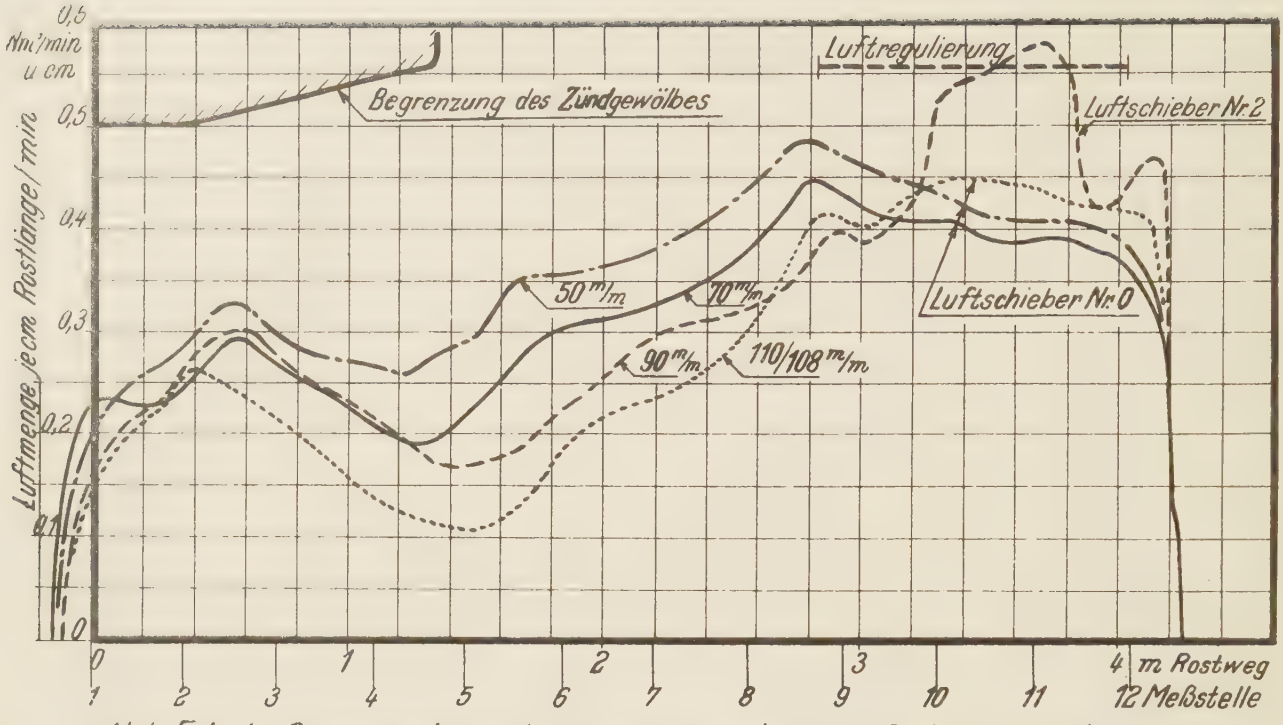


Abb. 51. Luftverteilung bei verschiedenen Schichthöhen.
(1 cm Rostlänge = 1,26 × 0,01 = 0,0126 m² Rostfläche)

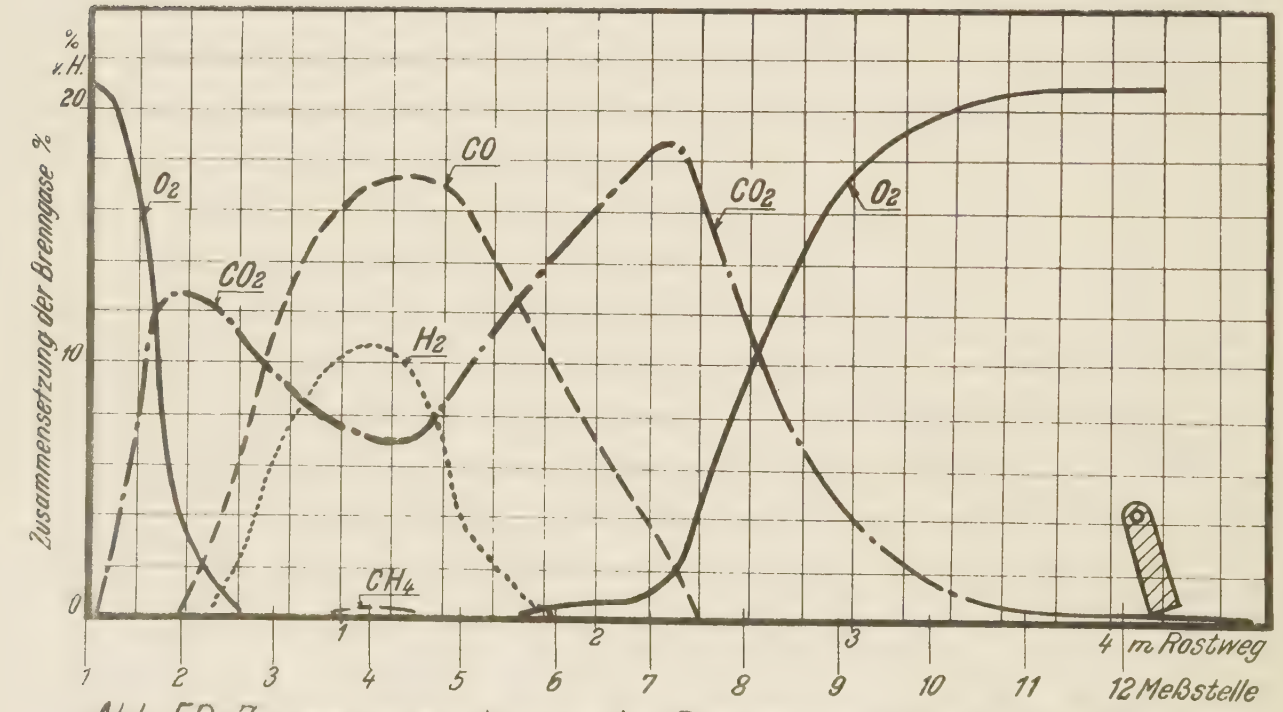


Abb. 52. Zusammensetzung der Brenngase über dem Wanderrost.
(Oberschl. Kohle, Schichthöhe 7 cm, Versuch 4 v. 16. 4. 32.)

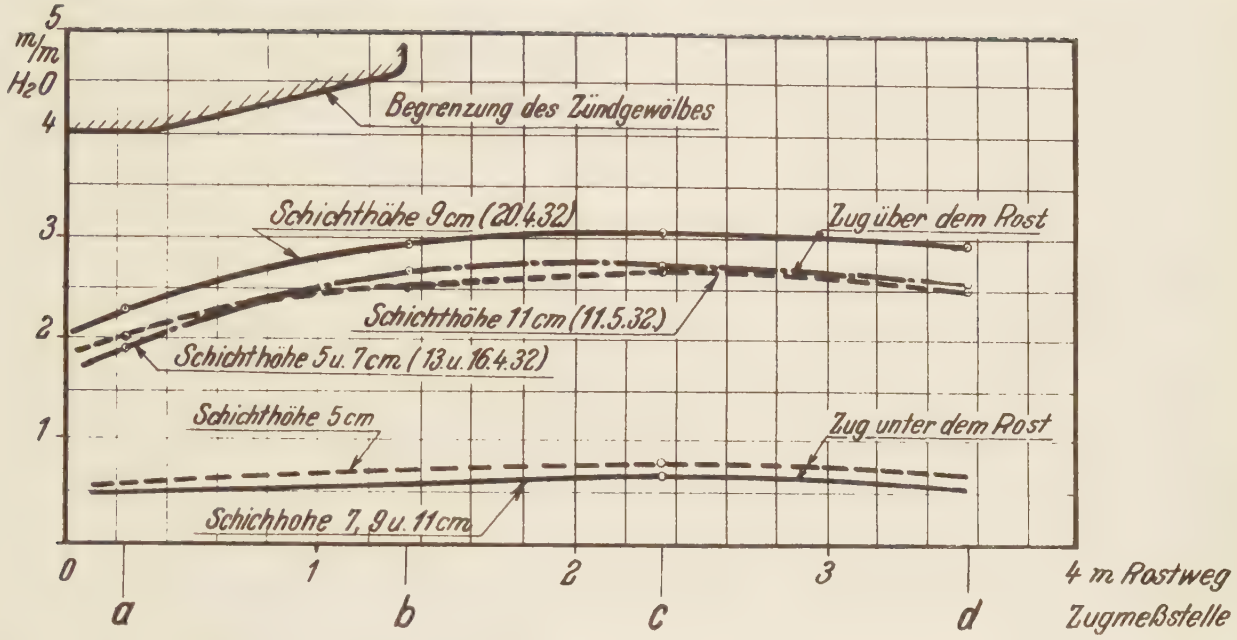


Abb. 53. Ergebnis der Zugmessungen über und unter dem Rost.

Abb. 54 - 63. Verbrennungsverlauf des Kohlen- und Wasserstoffes.

C_{CO_2} = zu CO_2 verbrannter Kohlenstoff
C_{CO} = " CO vergaster " "
H_{H_2O} = " H_2O verbrannter Wasserstoff
H_{H_2} = unverbrannter " "

= maximum der Luftgeschwindigk.
= minimum " " "
= Schicht bis zum Rost durchgezündet

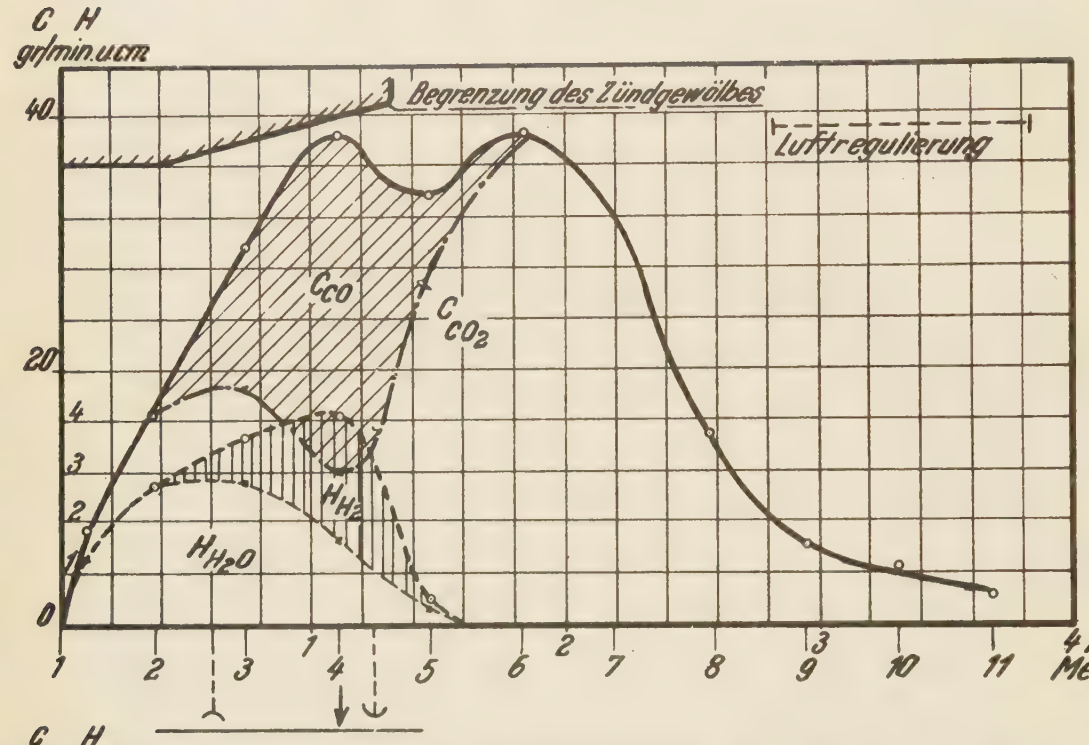


Abb. 54.
Versuch 1
vom 13.4.32.

Schichthöhe 5 cm.

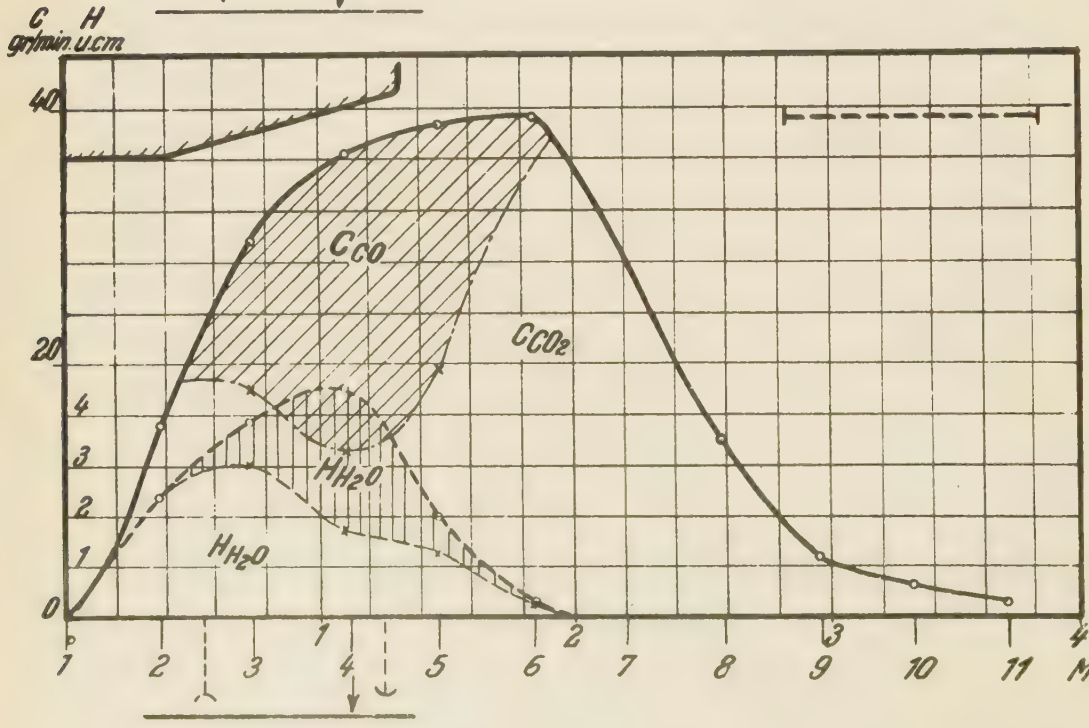


Abb. 55
Versuch 2
vom 13.4.32.

Schichthöhe 5 cm.

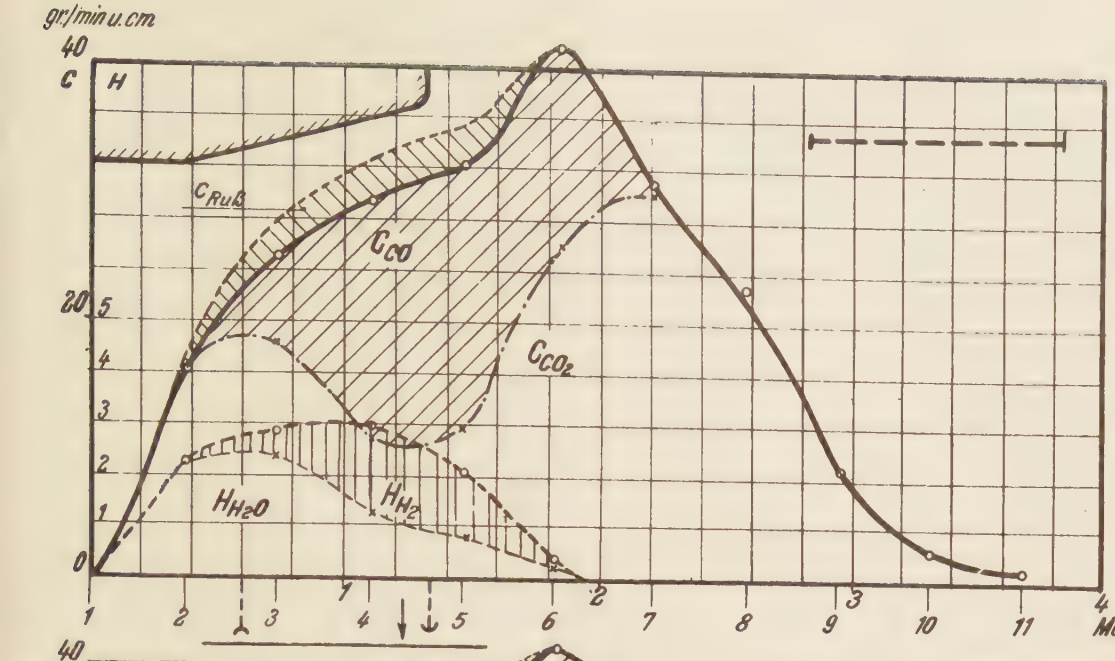


Abb. 56.

Versuch 3
vom 16. 4. 32.

Schichthöhe=
7 cm

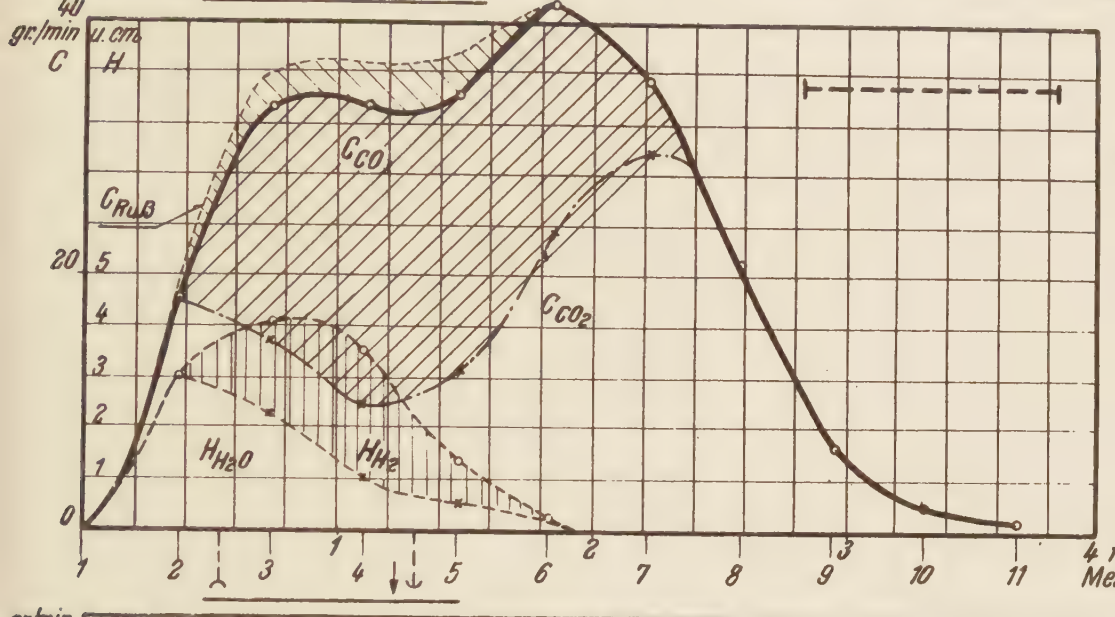


Abb. 57.

Versuch 4
v. 16. 4. 32.

Schichthöhe=
7 cm

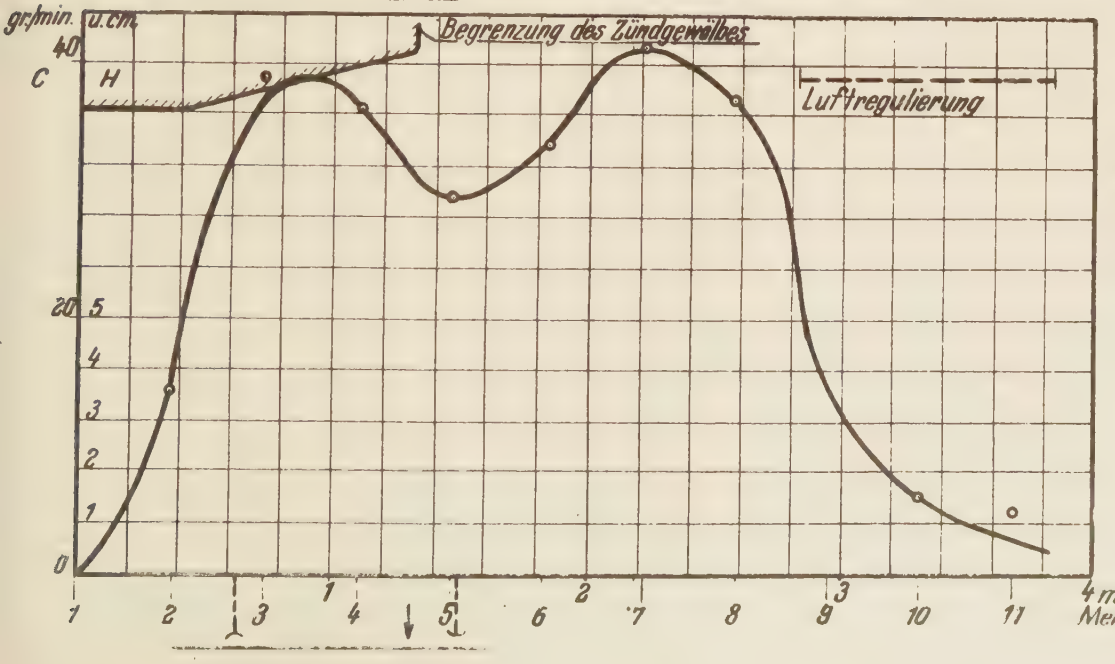


Abb. 58

Versuch 5
v. 20. 4. 32.

Schichthöhe=
9 cm

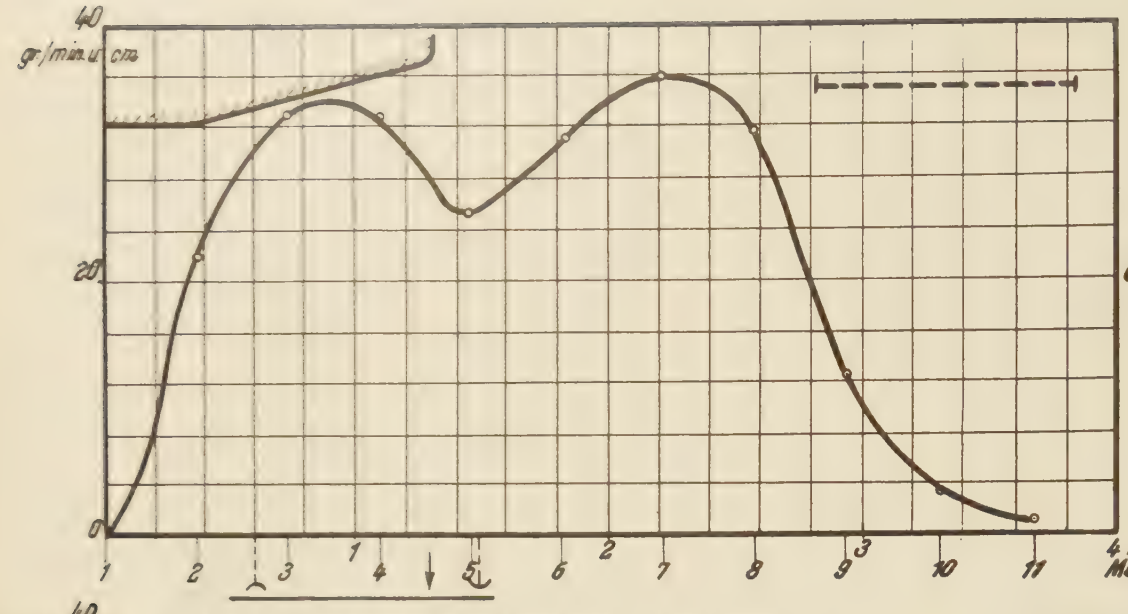


Abb. 59.
Versuch 6
v. 20.4.32.
Schichthöhe 9 cm

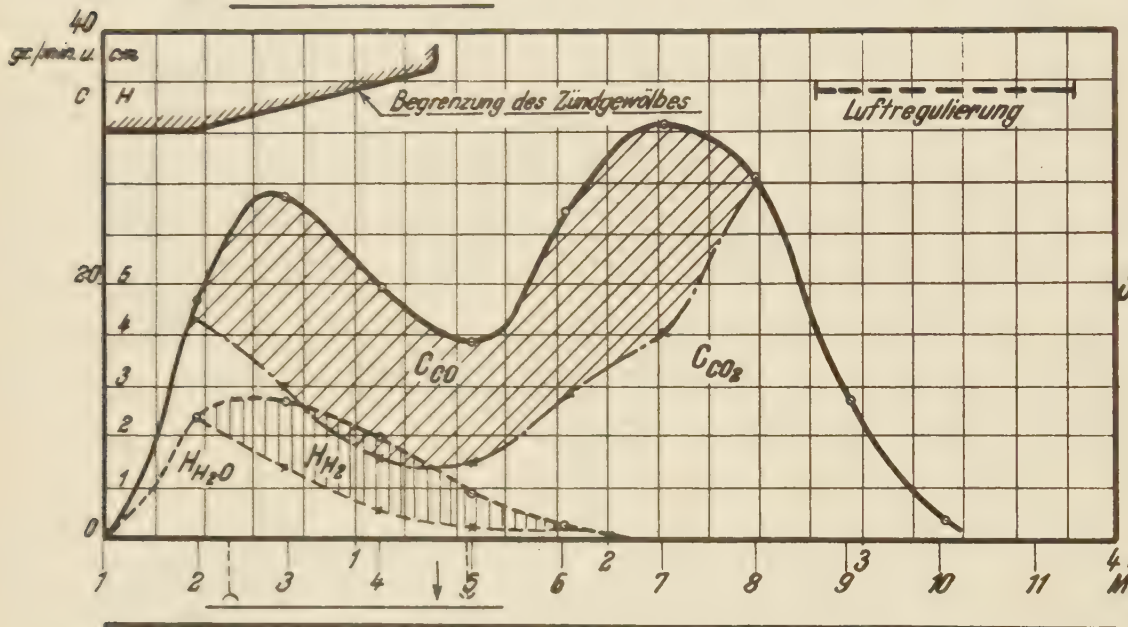


Abb. 60
Versuch 7
v. 11.5.32.
Schichth. 10,8/11 cm

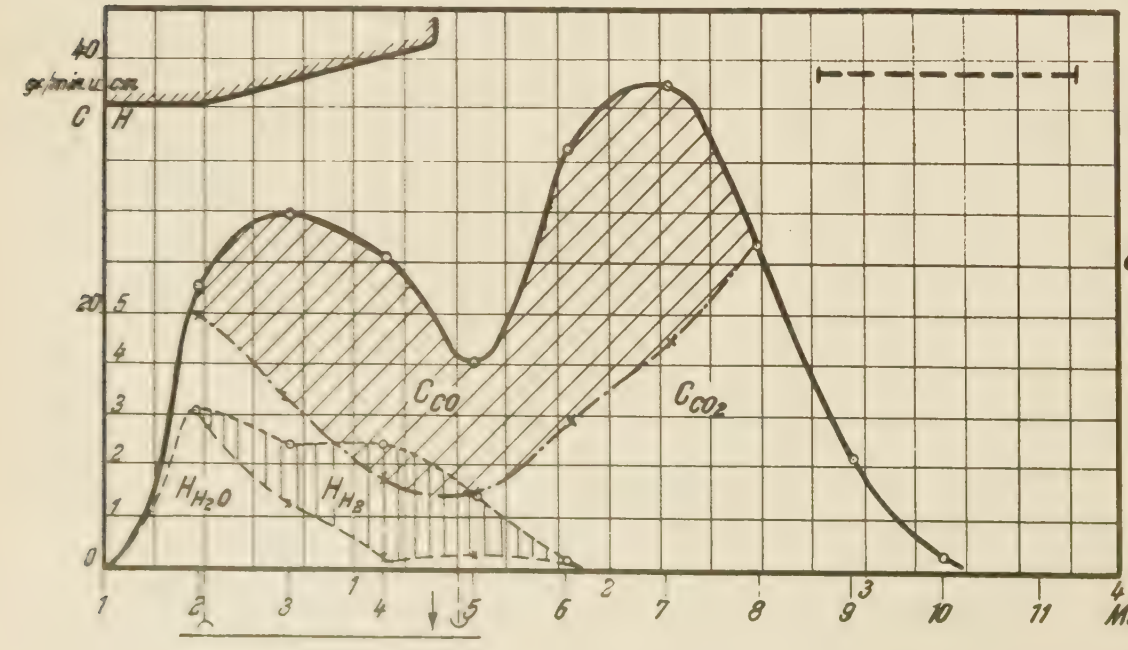


Abb. 61.
Versuch 8
v. 11.5.32.
Schichth. 10,8/11 cm

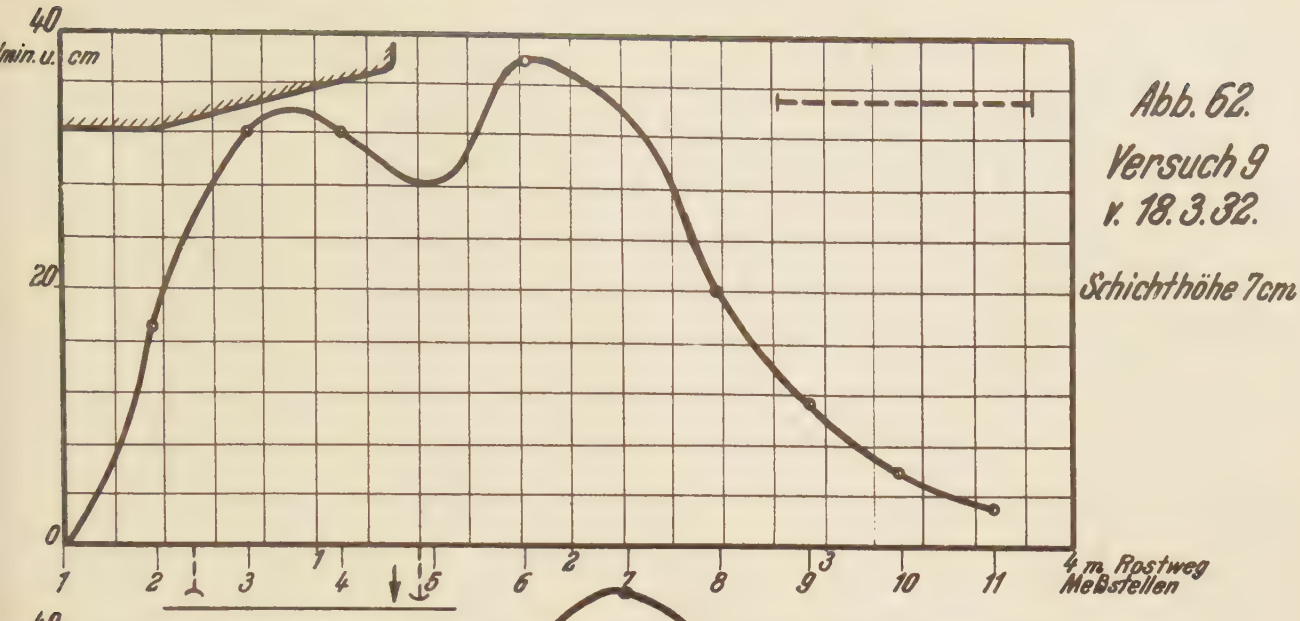


Abb. 62.
Versuch 9
v. 18.3.32.
Schichthöhe 7cm

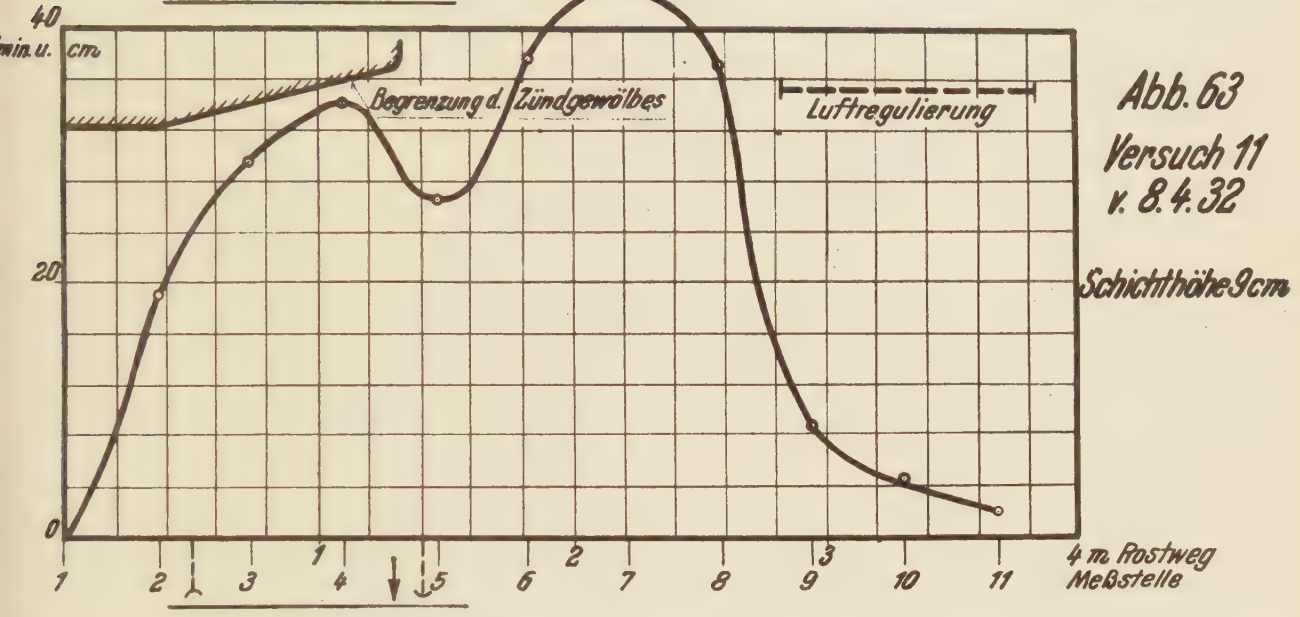


Abb. 63
Versuch 11
v. 8.4.32
Schichthöhe 9cm

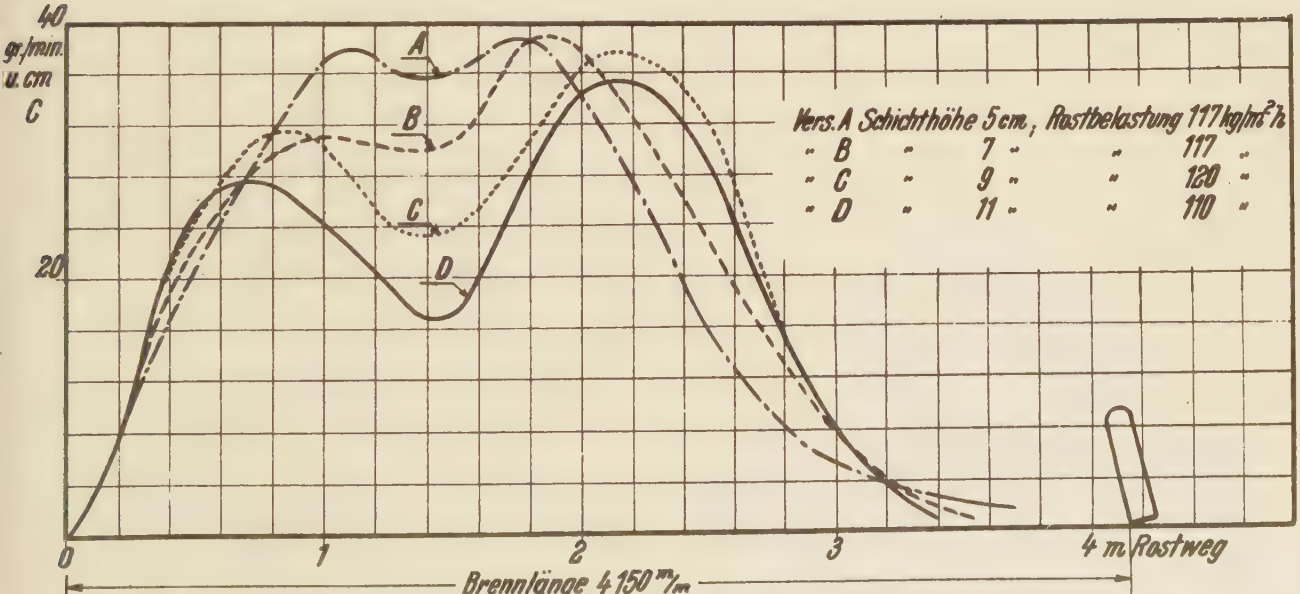


Abb. 64. Brennlinien oberschles. Steinkohle bei verschiedenen Schichthöhen.
(C gr Kohlenstoff/min und je Rostfläche von 1cm Länge, Rostfläche von 1cm Länge = 0,0126 m²)

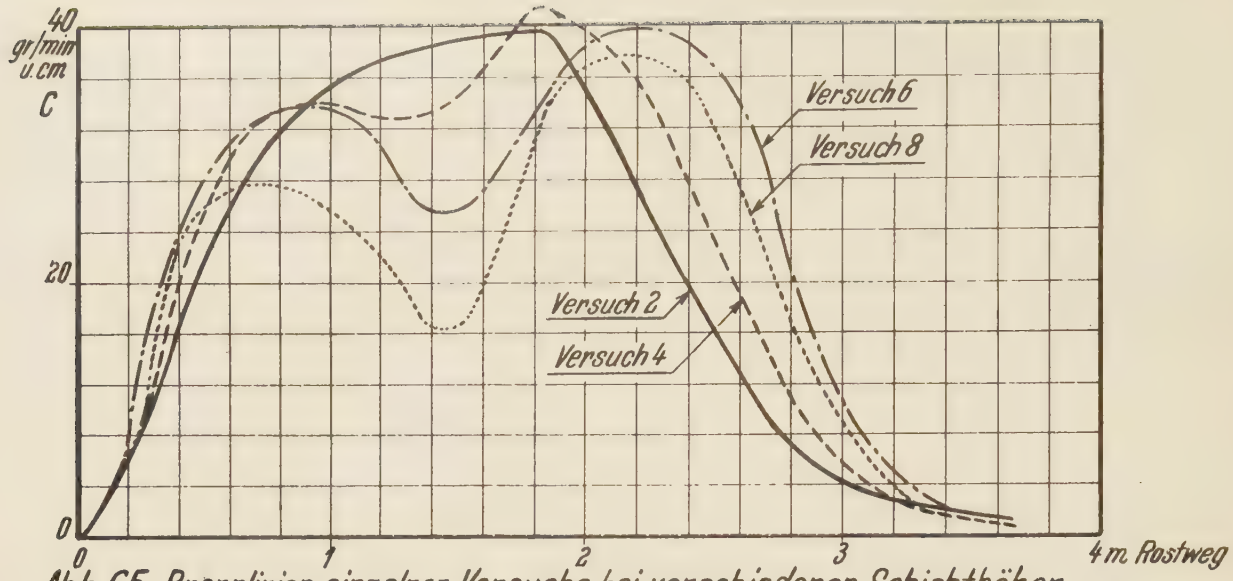


Abb. 65. Brennlinien einzelner Versuche bei verschiedenen Schichthöhen

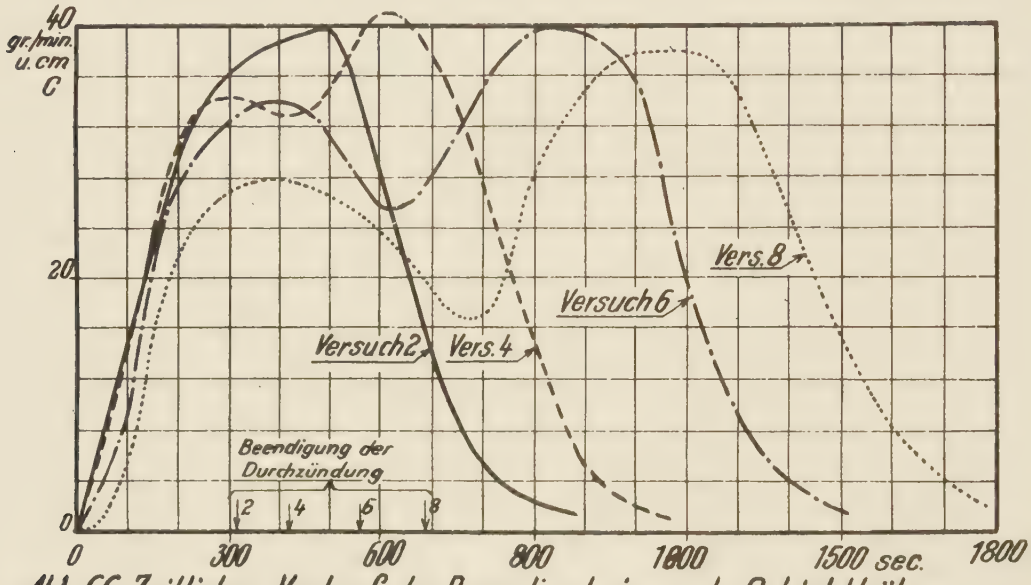


Abb. 66. Zeitlicher Verlauf der Brennlien bei versch. Schichthöhen.

Bem. zu Abb. 65 u. 66 C gr. Kohlstoff/min und je Rostfläche von 1 cm Länge
Versuch 2 Schichthöhe 5,3 cm Versuch 6 Schichthöhe 9 cm
" 4 " " 7 " " 8 " " 11/10,8 cm

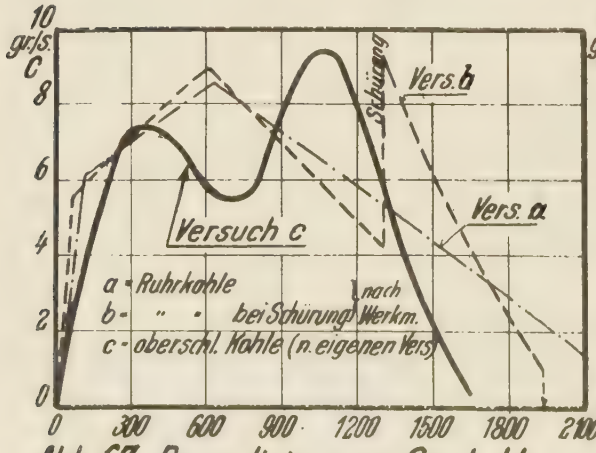


Abb. 67. Brennlinien von Gaskohle
Vergleich mit den Ergebn. v. Werkmeister
Rostleistung 130-150 kg/m²h, Schichth. 100 m/m

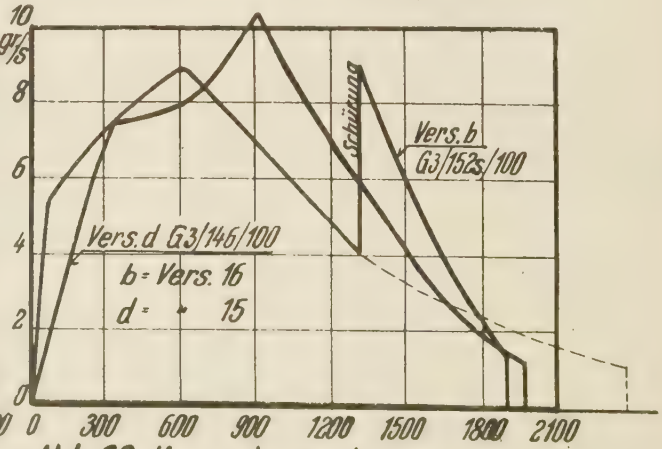


Abb. 68. Versuchsergebnisse von Werkmeister für die gleiche Kohle G3 und 100 m/m Schichthöhe.

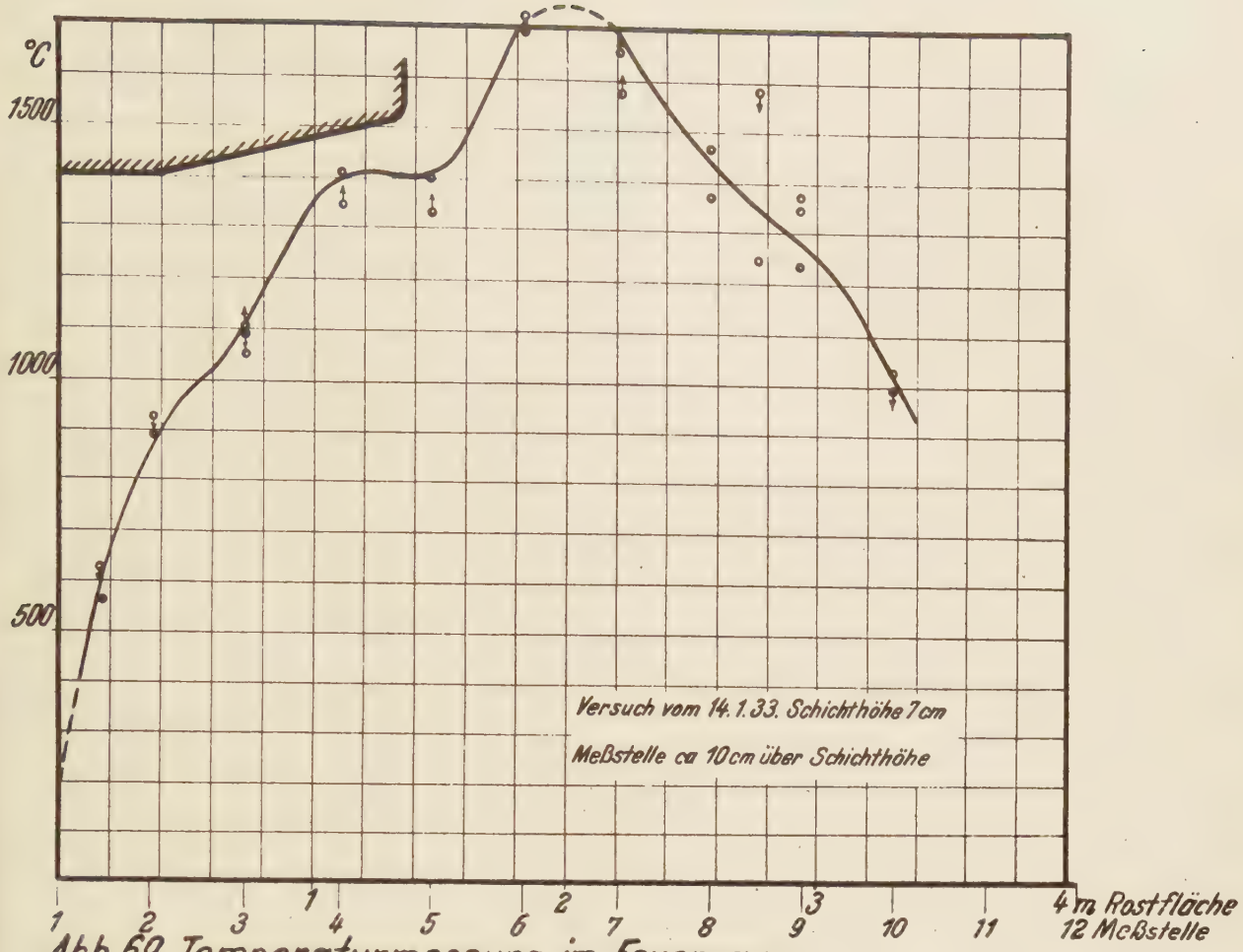


Abb. 69. Temperaturmessung im Feuerraum

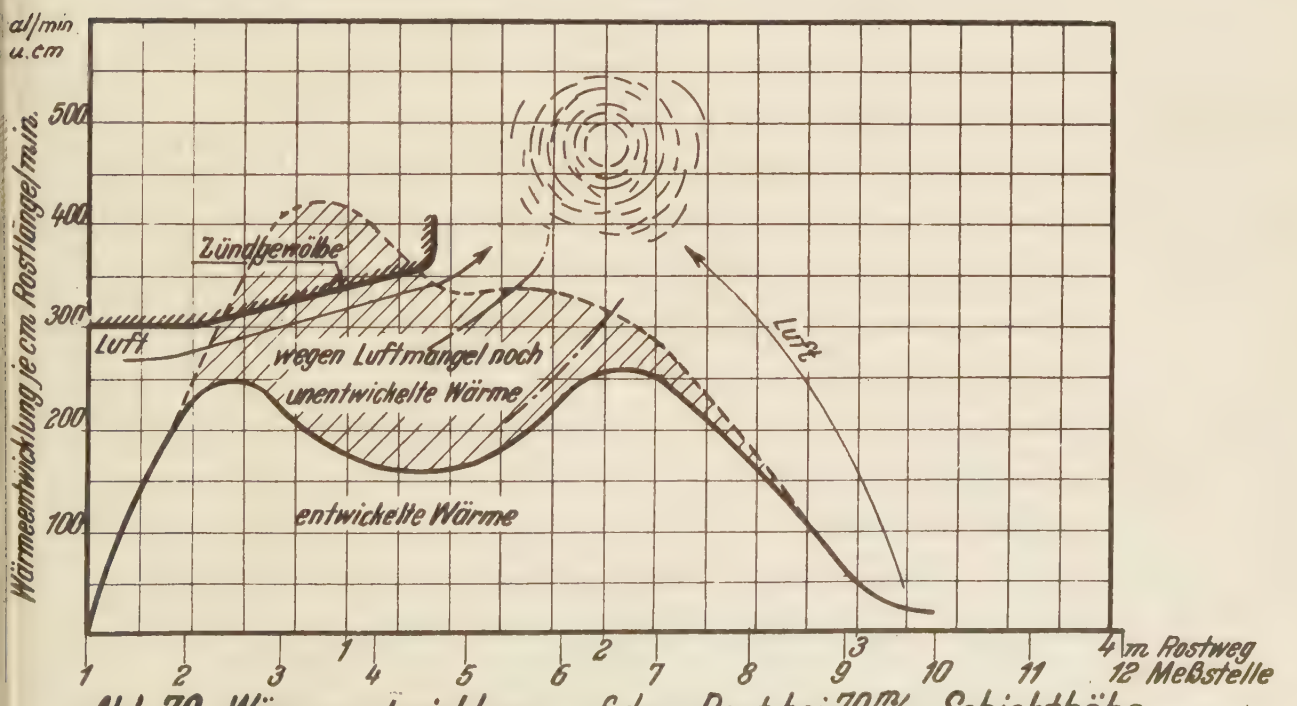


Abb. 70. Wärmeentwicklung auf dem Rost bei 70 m/m Schichthöhe

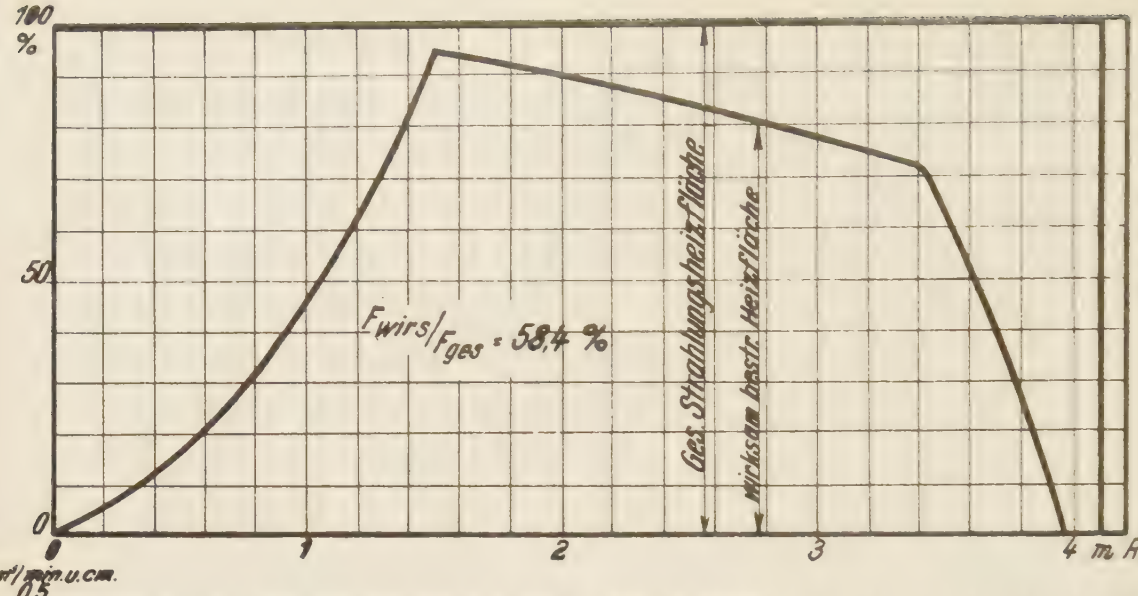


Abb. 71.

Bestrahlungs-diagramm unter Berücksichtigung der Abschirmung und des Winkelverhältnises.

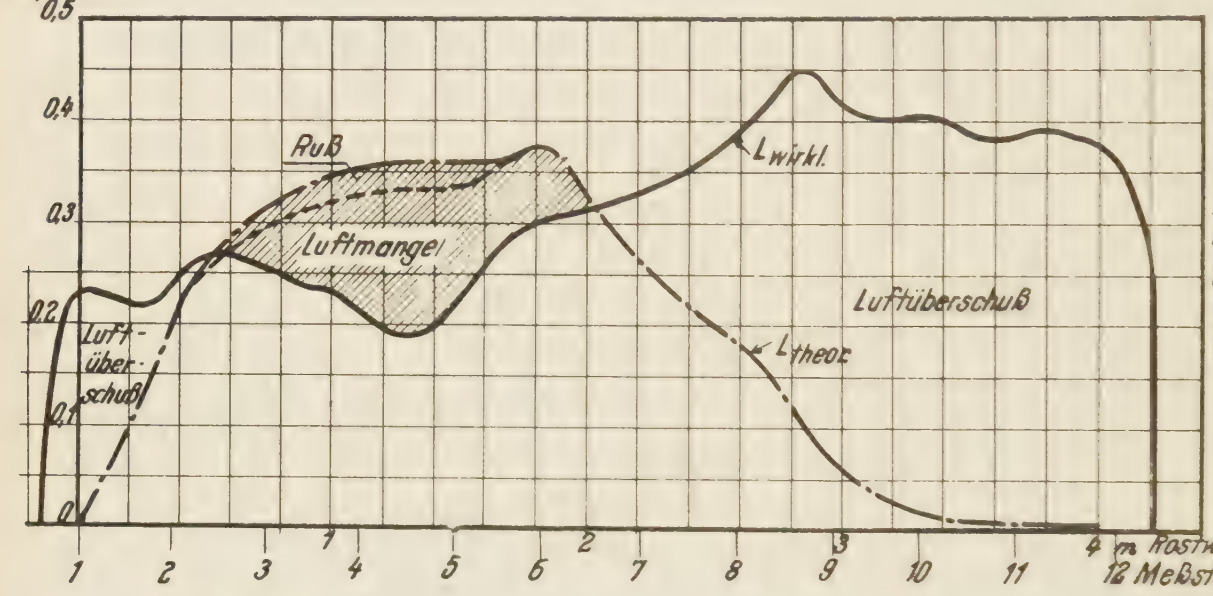


Abb. 72

Wirkliche und theoretisch erforderliche Luftverteilung für eine Schicht Höhe v. 7 cm.

(Versuch 3 vom 16.4.32. Luftüberschußzahl λ = 1,705)

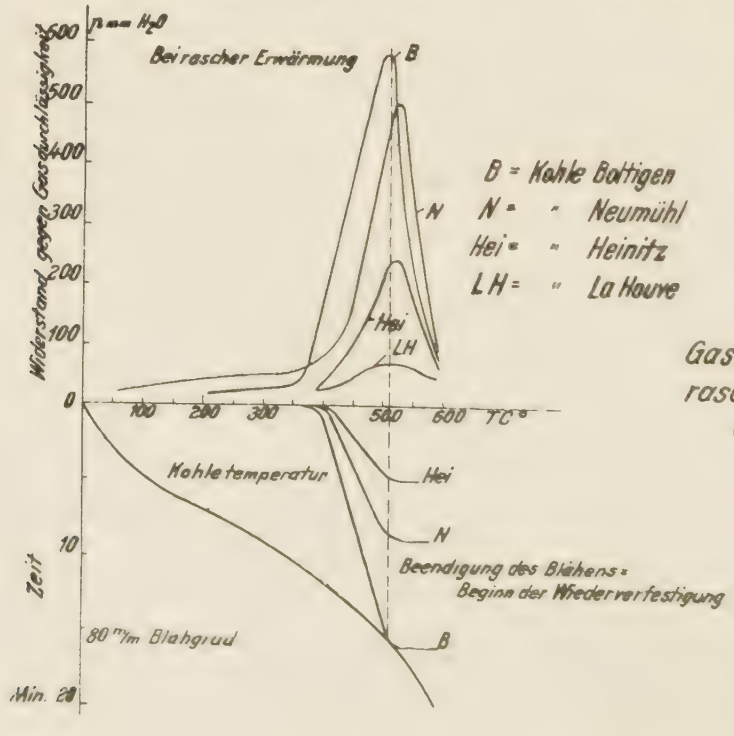


Abb. 73.

Gasdurchlässigkeit bei rascher Erwärmung

(nach Schläpfer)

L e b e n s l a u f .

Am 10. Februar 1903 wurde ich, Johannes, Karl, Rudolf Loewenstein, als Sohn des Oberschullehrers Otto Loewenstein und seiner Ehefrau Johanna Jda geb. Diepenbeck zu Duisburg a/Rh. geboren.

Schulbesuch: 12 Jahre Oberrealschule zu Duisburg (einschl. Vorschule). Abschluss: Reifeprüfung Ostern 1921.

Praktische Tätigkeit: 1 1/2 Jahre vor dem Studium bei den Rheinischen Stahlwerken und bei der Schiffswerft und Maschinenfabrik E. Berninghaus. Während des Studiums in der Giesserei der Duisburger Kupferhütte.

Technisches Studium: Besuch der Technischen Hochschulen in Darmstadt (Vorexamen), Danzig und Hannover. Unterbrechung des Studiums für ein Semester (S.S.1927) zwecks Betätigung als Konstrukteur bei den Siemens-Schuckertwerken (Abteilung Dampfturbinen) Mülheim-Ruhr. Diplomprüfung in Hannover im Frühjahr 1928.

Ingenieurtätigkeit: Vom 1. April 1928 bis 31. Mai 1929 als Ingenieur in der wissenschaftlichen Abteilung des Dampfturbinenbaues der Siemens-Schuckertwerke, Mülheim-Ruhr. Ab 1. Juni 1929 bis 30. September 1933 als planmässiger Assistent am Maschinen-Laboratorium der Technischen Hochschule Breslau Professor Dr. Ing. H. B a e r).

-.-.-.-.-.-.-.-